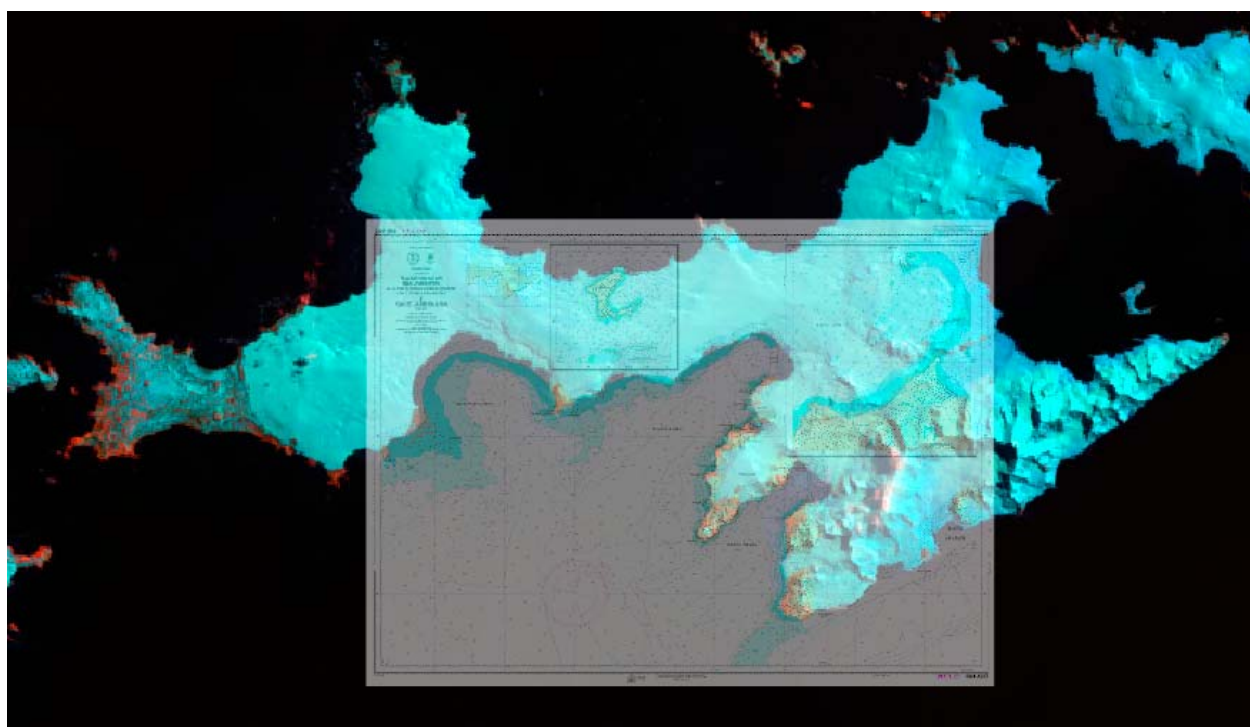




Cálculo del retroceso glaciar en Isla Livingston y de su línea de costa para actualización de cartografía#

#

Máster en Tecnologías de Información Geográfica



Rebeca Copé de los Mozos

Tutora: M^a Eugenia Pérez González

INDICE

INTRODUCCIÓN	3
1. ANTECEDENTES.....	4
2. EL IHM Y LA ANTÁRTIDA	6
3. LA ZONA DE ESTUDIO.....	9
3.1. Climatología	10
4. GLACIARES	13
5. IMÁGENES SATÉLITE	14
6. METODOLOGÍA	18
7. PROCEDIMIENTO Y RESULTADOS	21
7.1. Reconocimiento del terreno	21
7.2. Clasificación supervisada.....	30
7.3. NDSI	36
7.4. Ratio 3/5.....	41
7.5. Ratio 4/5.....	45
7.6. Digitalización manual	49
7.7. Resultados	51
8. CONCLUSIONES	53
BIBLIOGRAFÍA	55
ANEXO I.....	57
ANEXO II.....	58
ANEXO III.....	59
ANEXO IV	60
ANEXO V	61

INTRODUCCIÓN

Diferente a lo que se suele suponer si se piensa en el cambio climático, la extensión de hielo en los mares que rodea a la Antártida se ha incrementado en los últimos 15 años y muestra en conjunto una tendencia positiva y estadísticamente significativa¹. Aunque el continente más austral también registra amplias diferencias espaciales, con una notable pérdida de hielo marino en la costa occidental de la Península antártica y grandes incrementos en las costas continentales atlántica y pacífica. A pesar de ello, es evidente el deshielo que están sufriendo los glaciares continentales de la Antártida, sobre todo en la zona de la Península Antártica, de clima menos frío que el continente por su menor latitud y carácter oceánico, que suaviza las temperaturas.

El retroceso glaciar conlleva que la cartografía tenga que ser actualizada cada cierto periodo de tiempo.

Gracias a los avances tecnológicos se ha conseguido obtener visiones panorámicas de toda la superficie terrestre mediante los satélites artificiales, de tal forma que mediante análisis multitemporales de estas imágenes se pueden determinar las variaciones ocurridas en determinadas zonas de la tierra, pueden servir como complemento a trabajos en el terreno y en situaciones de inaccesibilidad del terreno son especialmente útiles.

¹ Pérez González, M.E. y García Rodríguez, M. P. (2014). “*Evolution in sea ice from 1978 to 2012*”. Environmental Earth Sciences.

El Instituto Hidrográfico de la Marina tiene publicadas cartas náuticas de la zona de las Islas Shetland del Sur al norte de la Península Antártica desde el año 1988, concretamente del Sur de Isla Livingston, y además tiene previsto en un futuro próximo publicar algunas nuevas, por lo que la utilización de satélites para actualización de cartografía en estas zonas sería ventajoso en cuanto al ahorro de tiempo y dinero.

El propósito de este trabajo es determinar el retroceso glaciar producido en Isla Livingston en la Antártida desde el año 1988 hasta el año 2014 a partir de imágenes satélite y empleando diferentes metodologías, así como determinar la variación ocurrida en la línea de costa.

1. ANTECEDENTES

El 08 de enero de 1988, en pleno verano austral, comienza el montaje de la instalación de la Base Antártica Española Juan Carlos I. Se encuentra situada en Isla Livingston, en el archipiélago de las Shetland del Sur, y es dependiente del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC).



Fig. 1. Base Juan Carlos I vista desde tierra



Fig. 2. Base Juan Carlos I vista desde la mar

Como apoyo a esta estación científica, se desarrolla la primera expedición a la Antártida a bordo del barco “Río Baker” de la empresa chilena Empremer-Valparaíso, que sale de Punta Arenas el 02 de febrero de 1988 y retorna el 07 de marzo. En esa campaña comienzan los primeros levantamientos hidrográficos realizados por parte de personal del IHM consistentes en la realización del parcelario de la base.

El siguiente verano austral parte el primer buque oceanográfico español, el antiguo remolcador “Las Palmas”, hacia la Antártida. En dicha expedición se comienzan los levantamientos topográficos, geodésicos e hidrográficos para poder asegurar la navegación propia en la zona y para conocer en detalle los fondeaderos y refugios, con base a su utilización en condiciones de mal tiempo, así como para iniciar el conocimiento del territorio necesario para su estudio e instalaciones futuras.



Fig. 3. Buque Oceanográfico “Las Palmas”

En esta campaña se instala también el refugio-observatorio (temporal) Gabriel de Castilla, gestionado por el Ejército de Tierra en Isla Decepción, también en el archipiélago de las Islas Shetland del Sur, que quedará establecido como refugio permanente en la campaña del año siguiente para apoyar los trabajos de investigación y levantamientos topográficos. En el año 1999 pasa a ser considerado Base Antártica.

Para obtener posicionamientos a los que referir los distintos levantamientos geodésicos y topográficos efectuados en la zona, en la primera campaña del año 88, se utilizaron los satélites de navegación geodésicos de la Red TRANSIT². En Isla Decepción se determinaron 3 puntos mediante un equipo de receptores TRANSIT de una frecuencia “MAGNAVOX® MX-1102”,

² Primer sistema de navegación por satélite en funcionar.

especialmente diseñados para la navegación, propiedad del Instituto Español de Oceanografía, y a partir de los cuales se estableció una red topográfica mediante poligonales y taquimetrías.

En esta misma campaña en Isla Livingston se establecieron dos puntos con un receptor de satélites TRANSIT, propiedad del Instituto Geográfico Nacional, y se radió una red topográfica. El datum utilizado para esta campaña fue el WGS-72.

Al año siguiente, en la campaña del 89 se utilizaron receptores GPS geodésicos TRMBLE® 4000 SLD, propiedad del Real Observatorio de la Armada, que proporcionaban posicionamientos referidos al datum WGS-84. En esta ocasión se establecieron 6 vértices geodésicos, dos en Isla Livingston, dos en Isla Decepción, uno en Isla Greenwich y uno en Almirante Brown. Desde ese año todas las situaciones fueron referidas al datum WGS-84.



Fig. 4. Personal hidrógrafo sondando en Bahía Sur

A partir de los datos obtenidos en estas primeras campañas, el IHM publica las primeras cartas náuticas de la zona antártica.

2. EL INSTITUTO HIDROGRÁFICO DE LA MARINA Y LA ANTÁRTIDA.

La misión principal del Instituto Hidrográfico de la Marina es velar por la seguridad de la navegación en sus aspectos de obtener y difundir información sobre el mar y el litoral, y contribuir al progreso de la Ciencia Náutica. Y en cumplimiento con esta misión, es de su competencia el cometido de la elaboración de cartas náuticas y la ejecución de todos aquellos trabajos geográficos e hidrográficos de interés para la Armada. Así también, es el representante del Estado Español en la Organización Hidrográfica Internacional, y forma parte del Comité Hidrográfico sobre la Antártida, entre

otros. El objetivo de este comité no es otro que promover la cooperación técnica en materia de levantamientos hidrográficos, cartografía marina e información náutica en dicha región

La cartografía de la zona Antártica no está asignada a ningún país especialmente, y España, mediante las campañas antárticas realizadas en las que han formado parte de ellas personal del Instituto Hidrográfico de las Marina, ha ido obteniendo datos para producir esta cartografía. Actualmente posee 6 cartas náuticas de la zona, de Isla Livingston, principalmente, y una de Arthur Harbour, del año 1991, de la que ha aportado únicamente batimetría de la zona; el resto se completó con datos de la carta estadounidense 29123, tanto batimetría como línea de costa.

De la 001 ANT hasta la 004 ANT son las cartas existentes de Isla Livingston. La 004 es la que abarca una mayor zona de la isla, y el resto va reduciendo la zona según va aumentando la escala. Se pueden ver en los anexos I, II, III y IV.

La última de las cartas publicadas es la 7002 (Anexo V), también de Isla Livingston, de la zona de la Península de Byers. Esta carta salió publicada en 2013 y es el resultado de dos expediciones, en los años 2009 y 2012, después de que en el año 1997 se paralizase la participación del IHM en las expediciones a la Antártida.

Desde el punto de vista de la cartografía náutica, la línea de costa está considerada como una línea doble, compuesta por la zona de la pleamar y la línea de la bajamar, de forma que delimita, en sentido horizontal, la zona de transición entre la tierra y el mar allí donde las mareas son apreciables y que se confunden en una en aquellas que no lo son.

En la cartografía española, la línea de costa se obtiene a partir de restitutiones fotogramétricas de vuelos realizados por el Ejército del Aire y por taquimetrías realizadas por el personal hidrógrafo.

La línea de costa de Livingston se obtuvo en las primeras cartas con las taquimetrías realizadas por el personal hidrógrafo, excepto en la zona de glaciares y neveros, que se completaron con restitutiones fotogramétricas de vuelos británicos del año 1957 por parte de la Falkland Islands and Dependencies Aerial Survey Expedition (FIDASE). En la 7002, la última de ellas publicada, la costa ha sido obtenida por taquimetrías realizadas mediante GPS en modo RTK.

El interés del IHM por la cartografía antártica persiste en cuanto a que en el proyecto cartográfico se contemplan 8 nuevas cartas (incluyendo la ya publicada 7002) que actualizarían las cartas actuales, y que se pueden ver en las fig. 5 y 6:

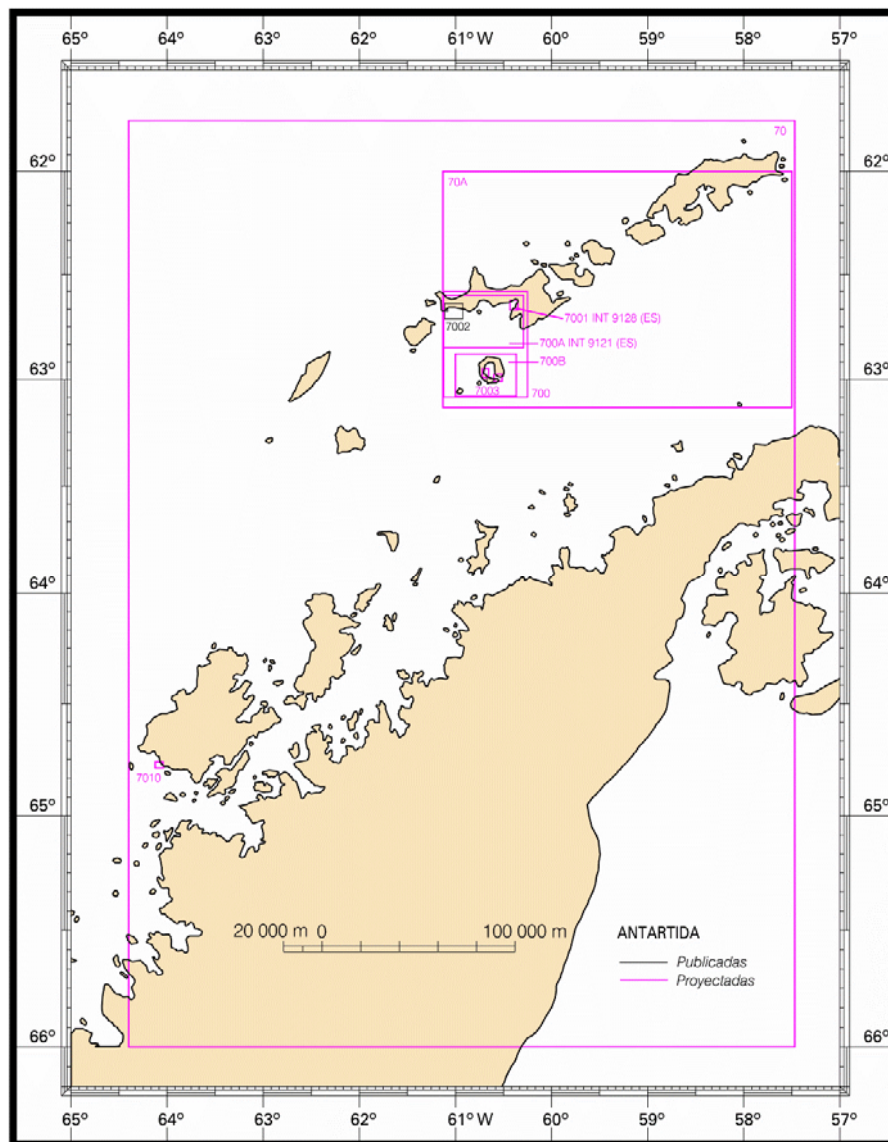


Fig. 5. Proyecto cartográfico en la Antártida del IHM

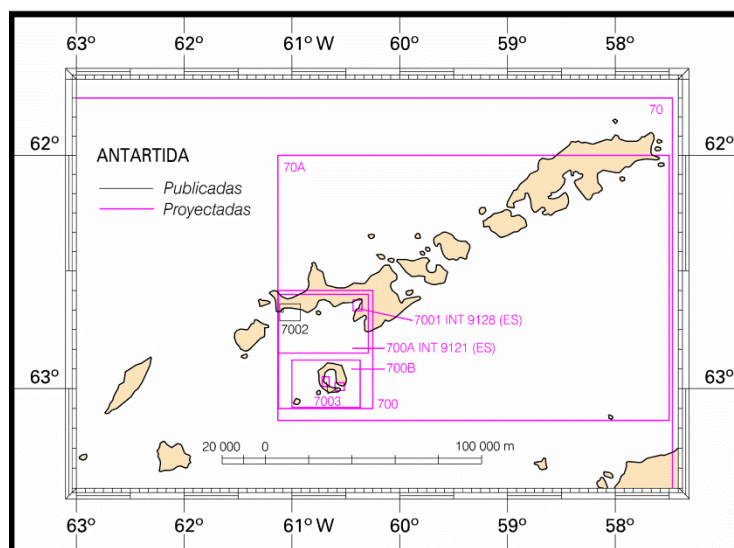


Fig. 6. Detalle del proyecto cartográfico en la Antártida

El problema de la cartografía en zonas donde existen glaciares es que debido a su retroceso la cartografía en estas zonas necesita una actualización periódica, tanto de la línea de costa como de la batimetría, puesto que en zonas que antes estaban cubiertas por glaciar y donde éste ha desaparecido, el fondo marino es incierto.

En este estudio se pretende calcular el retroceso glaciar ocurrido desde las primeras campañas realizadas por el IHM hasta la época actual mediante imágenes satélite, que además servirán para actualizar la línea de costa.

Otro aspecto que hay que tener en cuenta es que la línea de costa tal como se define debería venir determinada por la pleamar y la bajamar, pero teniendo en cuenta la dificultad de obtener sondas menores en este tipo de zona y que existen zonas de difícil acceso no hidrografiadas, siempre es mejor considerar una línea de costa sin aplicarle la reducción de las mareas, que mantener una línea de costa que ha variado considerablemente.

Por último, señalar, que el Servicio Cartográfico del Ejército de Tierra también es poseedor de cartografía terrestre en esta zona, pero se encuentra del mismo modo desactualizada.

3. LA ZONA DE ESTUDIO

Isla Livingston pertenece al archipiélago de las Shetland del Sur, situado a unos 1000 Km del continente sudamericano, y está separado de él por el paso de Drake, y por el Estrecho de Bransfield de la Península Antártica, de la que dista unos 100 Km.

Las Islas Shetland del Sur, formadas por once islas mayores, se encuentran situadas entre los 61° y los 64° de latitud Sur y los 54° y los 63 ° de longitud Oeste.

Isla Livingston, al igual que el resto de las islas que forman las Shetland del Sur, está constituida por casquetes de hielo impuestos sobre la topografía, quedando en términos medios porcentajes no superiores al 10% de la extensión total de las islas descubiertas de hielo. En particular, Isla Livingston, con una extensión total aproximada de 800 Km², es la segunda extensión del archipiélago después de la Isla Rey Jorge, y aproximadamente, sólo un 9% de la isla queda descubierta de hielo³.

³ Corberá, J., Calver, J., Palá, V. "Estudio por teledetección de la dinámica del glaciar de Bahía Falsa Isla Livingston (Antártida)". Revista de Teledetección núm 6. Junio, 1996.

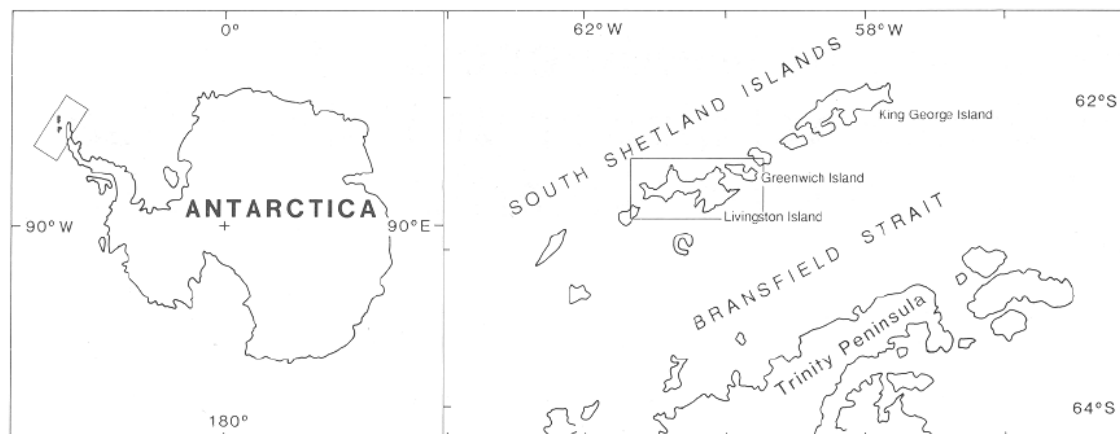


Fig.7. Situación de isla Livingston

En Isla Livingston se diferencian tres sectores: el sector oriental, que alcanza las mayores altitudes de la isla, hasta 1.770 metros; el sector central, un estrecho lineal que presenta glaciares de domo, y la parte occidental, de escasa altitud y con la mayor parte de su superficie libre de hielo.

En las islas Shetland del Sur se encuentran 8 glaciares rocosos activos. Están localizados sobre penínsulas y cabos en las dos principales islas del archipiélago: Rey Jorge y Livingston.

Hay que destacar también la importante actividad sísmica de la zona norte de la Península Antártica, encontrándose en la Isla Decepción uno de los escasos volcanes activos de la Antártida. En esta zona durante el siglo XX se produjeron erupciones durante cortos periodos de tiempo, hasta que en 1992 la creciente actividad sísmica en isla Decepción se vio acompañada por la deformación del suelo y por el incremento de la temperatura del agua. El sitio está clasificado como una caldera activa con riesgo volcánico significativo⁴.

3.1. Climatología

La proximidad al mar y los condicionantes latitudinales son los rasgos que mayor influencia ejercen en el clima subpolar marítimo que rodea a la Península Antártica. La cercanía del océano actúa produciendo un clima menos severo que el que rige en el interior continental. Además, la costa oeste de la Península Antártica, donde se encuentra Isla Livingston, es menos fría y más húmeda que la costa este, debido a que el mar se halla habitualmente deshelado entre enero y marzo.

Según Bañón⁵ la presión atmosférica media de esta zona se sitúa alrededor de los 990 milibares, aunque presenta grandes variaciones diarias. Las

⁴ www.deceptionisland.aq

⁵ Aguilar Anfrons, E. "Caracterización del patrón térmico diario estival. Sector de Johnson's dock. Isla Livingston. Shetland del Sur (Antártida)". Dentro del Vilá Valentí, Joan. El seu mestratge en la Geografia Universitaria. Universidad de Barcelona. Pág. 463.

temperaturas medias del verano pueden alcanzar valores máximos superiores a 10°C, mientras que durante el resto del año los promedios térmicos diarios descienden por debajo de 0°C, con temperaturas mínimas de hasta -35°C. La humedad relativa es elevada, pues acostumbra a superar el 80%, mientras que la humedad absoluta, debido a las características térmicas de las masas de aire antárticas, es notablemente baja. El paso de ciclones móviles procedentes especialmente del cuadrante noroeste que adventan aire húmedo y templado, sumado a las ascendencias forzadas de aire debidas a la configuración topográfica de Isla Livingston, provoca una abundante cobertura nubosa que supera frecuentemente las 7 octas, compuestas principalmente por nubes bajas de tipo estratiforme.

Si bien la precipitación nivosa es predominante durante la mayor parte del año, la precipitación líquida puede ocurrir durante la estación veraniega, especialmente en forma de llovizna. Entre un 85 y 90% de los días del año alcanzan precipitación, aunque en las tres cuartas partes de los mismos el pluviómetro alcanza valores inapreciables. Los meses con más precipitación acumulada son marzo y febrero, con una media de 77 y 55 l/m² desde el año 2005⁶.

Los vientos predominantes durante todo el año son los de componente Norte, rolando al Noreste durante el verano.

La Agencia Estatal de Meteorología posee datos meteorológicos de Isla Livingston obtenidos de estaciones situadas en la Base Juan Carlos I. No existen datos de todo el año en todo el periodo desde 1988, por lo que se representarán las medias anuales de la época estival (diciembre, enero y febrero), exceptuando 1997, del que no se tienen datos para todos esos meses.

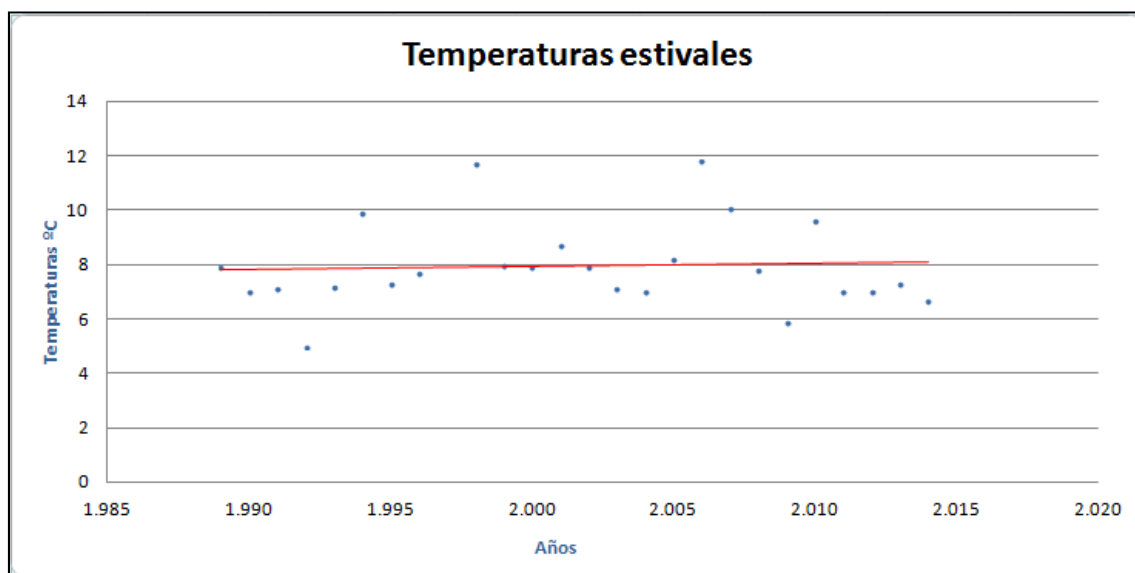


Fig. 8. Evolución de las temperaturas estivales. Fuente: AEMET

⁶ Datos proporcionados por AEMET.

En la gráfica se ha representado la línea de tendencia, y como se observa, ésta es prácticamente estable a lo largo de los 26 años (Fig. 8).

Los datos anuales completos aparecen a partir del año 1999, lo que se comprueba con ellos las variaciones anuales y el resultado es también una línea de tendencia estable (Fig. 9).

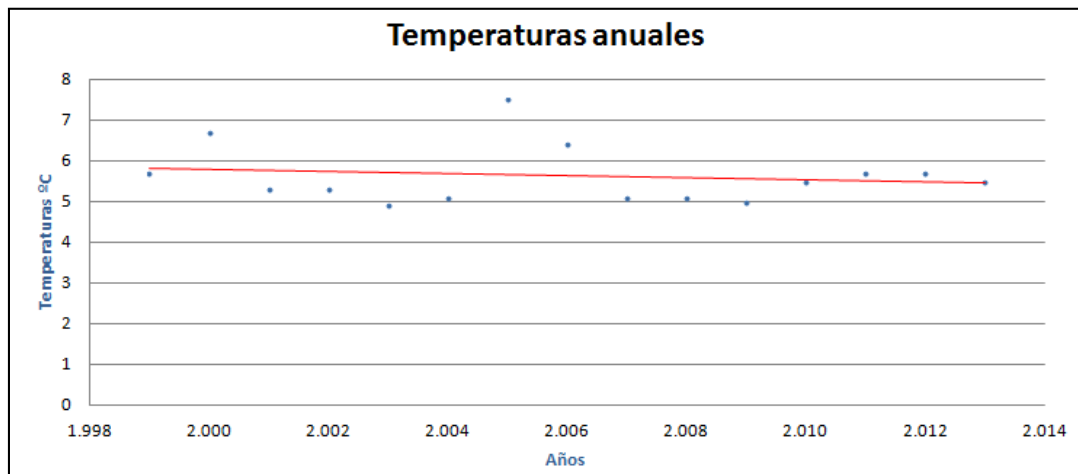


Fig. 9. Evolución de las temperaturas anuales. Fuente: AEMET

En cuanto a las precipitaciones, tampoco existen datos en todos los meses en los años de estudio, así que se hace lo mismo que con las temperaturas, primeramente se analizarán los datos durante el verano y posteriormente desde el año 2005, que es el año donde empieza a haber datos completos de precipitación por mes.

En los datos estivales se aprecia una línea de tendencia con un ligero descenso en cuanto a las precipitaciones, si bien, no es estadísticamente significativo (Fig. 10).

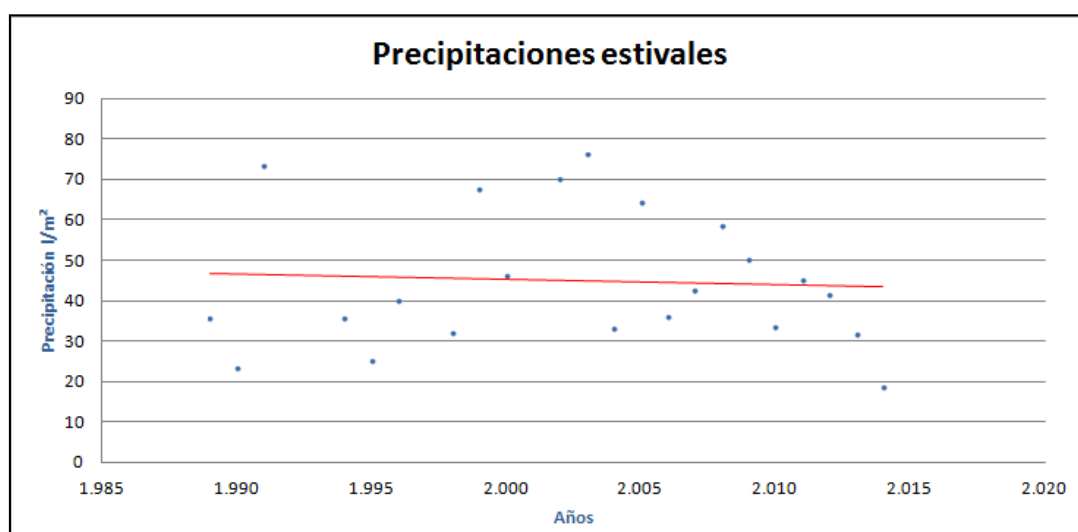


Fig. 10. Evolución de las precipitaciones estivales. Fuente: AEMET

Y en cuanto a la totalidad del año, éste descenso es ligeramente mayor (Fig. 11).

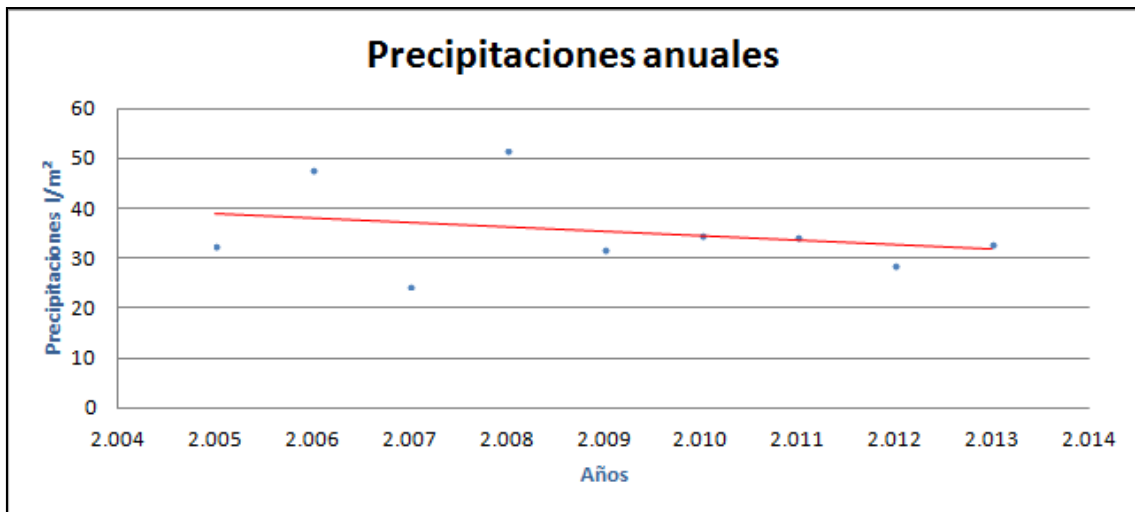


Fig. 11. Evolución de las precipitaciones anuales. Fuente: AEMET

4. GLACIARES.

Atendiendo a la definición de glaciar hecha por Strahler y Strahler, un glaciar puede definirse como “*una gran acumulación natural de hielo situada en tierra firme y afectada por un movimiento pasado o presente*”⁷. Es necesario que la nieve precipitada en invierno sea mayor que la ablación producida en verano, de tal manera que cada año se vaya superponiendo una masa de nieve sobre la acumulada anteriormente. A medida de que esta nieve se compacta, se transforma en hielo granular y éste se convierte en hielo cristalino cuando se va comprimiendo por las capas superiores. También se mantiene si las condiciones térmicas favorecen la permanencia del hielo acumulado décadas atrás.

Los glaciares se distribuyen geográficamente en las zonas de alta montaña, por encima de nieves perpetuas y en áreas de altas latitudes.

Tal como se comentó en el apartado anterior, en Livingston existen glaciares glaciares rocosos. Estos glaciares son grandes masas de hielo, que se forman en la alta montaña y que se mueven lentamente pendiente abajo por deformación del hielo bajo su propio peso. Están cubiertos con escombros rocosos en espesores desde pocas decenas de centímetros hasta algunos metros. Los escombros llegan a los glaciares arrastrados por avalanchas de nieve, o bien caen sobre el glaciar desde las pendientes que los rodean. Al fundirse en los meses de verano parte de la nieve invernal con escombros,

⁷ Strahler, A.N. y Strahler, A.H. (1989). Geografía física. Barcelona, Omega, pág. 357.

estos se van quedando y acumulando en la superficie, hasta alcanzar un espesor tal que forman una coraza que protege a la nieve o hielo subyacente.

5. IMÁGENES SATÉLITE.

Uno de los avances tecnológicos más importantes de la actualidad son los satélites artificiales. Gracias a ellos se puede obtener una visión panorámica de toda la superficie terrestre.

Las imágenes satélites son capaces de visualizar y discriminar diferentes fenómenos geográficos, atmosféricos, ambientales... etc. Son una herramienta complementaria a los procesos de observación como puede ser la fotografía aérea o trabajos del terreno. Además, al presentar información sobre regiones no visibles del espectro, pueden proporcionar datos sobre estudios medioambientales, como la evolución de los glaciares. A través de un análisis multitemporal de las imágenes satélites se puede evaluar la evolución de los glaciares, y en el caso presente, en concreto, determinar su repercusión en la línea de costa de la zona antártica.

Según el Plan Nacional de Teledetección de Media Resolución de procesamiento estándar de imágenes satélite, se deben de aplicar una serie de correcciones antes de aplicar la información contenida en las imágenes satélite. La primera etapa es la corrección geométrica, es decir, la georreferenciación, asignando a cada píxel su coordenada geográfica correspondiente. También se aplican correcciones radiométricas, atmosféricas y topográficas.

Las correcciones radiométricas consisten en convertir los niveles digitales a radiación recibida por el sensor.

Las correcciones atmosféricas se aplican para eliminar las interferencias producidas por la absorción, dispersión y refracción.

Y las correcciones topográficas corrigen las diferencias de radiación entre un entre zonas de solana y umbría.

Las imágenes utilizadas en el estudio han sido obtenidas de la página web del "U.S. Geological Survey" (<http://earthexplorer.usgs.gov>), obtenidas con los satélites LANDSAT 5, LANDSAT 7 y la última con el más moderno, el LANDSAT 8. Estos satélites son de media resolución.

El satélite LANDSAT 5 está equipado con sensor "*Thematic Mapper*" (TM) que proporciona siete bandas espectrales con una resolución espacial de 30 metros para las bandas del 1 al 5 y la 7. La banda 6, correspondiente al infrarrojo térmico presenta una resolución de 120 metros.

LANDSAT 5	Espectro EM	Longitud de onda
Banda 1	Azul	0,45-0,52
Banda 2	Verde	0,52-0,60
Banda 3	Rojo	0,63-0,69
Banda 4	IR próximo	0,76-0,90
Banda 5	IR medio	1,55-1,75
Banda 6	IR térmico	10,40-12,50
Banda 7	IR medio	2,08-2,35

Tabla 1. Bandas espectrales del LANDSAT 5

La corrección aplicada a estas imágenes es la denominada por el USGS “LEVEL 1G”, corrección radiométrica y geométrica.

El satélite LANDSAT 7 proporciona 8 bandas espectrales iguales a las del LANDSAT 5 con resolución espacial de 30 metros, pero al disponer del sensor “*Enhanced Thematic Mapper Plus*” (ETM+) le añade una octava banda pancromática que proporciona una resolución de 15 metros.

Esta imagen del LANDSAT 7 presenta correcciones “LEVEL 1Gt”, es decir, correcciones radiométricas y geométricas en las que se han utilizado precisiones topométricas.

La imagen tomada por el LANDSAT 8 proporciona nueve bandas espectrales con resolución espacial de 30 metros en las bandas de la 1 a la 7 y la 9. La banda 8 es la pancromática y proporciona una resolución de 15 metros. El sensor que lleva es OLI e infrarrojo térmico.

LANDSAT 8	Espectro EM	Longitud de onda
Banda 1	Coastal aerosol	0,43 – 0,45
Banda 2	Azul	0,45 – 0,51
Banda 3	Verde	0,53 – 0,59
Banda 4	Rojo	0,64 – 0,67
Banda 5	IR próximo	0,85 – 0,88
Banda 6	IR medio	1,57 – 1,65
Banda 7	IR medio	2,11 – 2,29
Banda 8	Pancromática	0,50 – 0,68
Banda 9	Cirrus	1,36 – 1,38

Banda 10	IR térmico	10,60 – 11,19
Banda 11	IR térmico	11,50 – 12,51

Tabla 2. Bandas espectrales del LANDSAT 8

Como ocurre con la imagen del LANDSAT 7, las imágenes del LANDSAT 8 presentan correcciones “LEVEL 1Gt”.

Las bandas equivalentes entre los LANDSAT 5 y 7 y el LANDSAT 8 serían de la siguiente manera:

LANDSAT 5 y 7	LANDSAT 8	Espectro EM
Banda 1	Banda 2	Azul
Banda 2	Banda 3	Verde
Banda 3	Banda 4	Rojo
Banda 4	Banda 5	IR próximo
Banda 5	Banda 6	IR medio
Banda 6	Bandas 10 y 11	IR térmico
Banda 7	Banda 7	IR medio

Tabla 3. Equivalencia de las bandas espectrales de los satélites LANDSAT

Por tanto, todas las imágenes utilizadas están corregidas geográfica y radiométricamente. No se han realizado correcciones atmosféricas por carecer del módulo específico dentro del software de Teledetección; ni topográficas, que requieren datos in situ coetáneos con las fechas de las imágenes. También serían interesantes a futuro contar con imágenes radar que determinan con mayor precisión la topografía y características de los glaciares en áreas remotas, pero no se han podido adquirir para este trabajo.

La elección del LANDSAT como objeto del estudio es debido a la fácil obtención de las imágenes. Existen otros satélites que proporcionan mayores resoluciones y que para la obtención de la línea de costa proporcionan un detalle mucho mayor, como el *Ikonos*, el *Quickbird*, *WorldView* y *GeoEye*.

Ikonos puede tomar imágenes pancromáticas y multispectrales que pueden fusionarse para crear imágenes a color de 0,82 metros fusionadas (pan-sharpened). *QuickBird* es un satélite a color de 60 cm, de 4 bandas y es capaz de tomar imágenes pancromáticas y multispectrales. *WorldView-1* es un satélite pancromático de 50 cm. *GeoEye-1* adquiere imágenes pancromáticas de 0,41 metros y multispectrales de 1,65 metros. *WorldView-2* es un satélite a color de 50 cm, de 8 bandas.

Las imágenes que proporcionan estos satélites son comercializadas por la empresa *DigitalGlobe*. El precio de las imágenes varía en función del nivel del producto, es decir, según si tiene aplicadas correcciones o no, y la combinación de bandas que se pida.

Para hacerles una petición es necesario enviarles un archivo en formato “.shp” con el polígono de la zona de interés, o bien mediante dos coordenadas para los polígonos rectangulares.

El tamaño mínimo para un archivo de producto estándar son 25 Km², y el precio varía entre 13-29 \$ por Km², dependiendo de la combinación de bandas seleccionada.

El precio base para producto estándar de nueva adquisición varía entre 22-38 \$ por Km² dependiendo también de la combinación de bandas seleccionada, y su tamaño mínimo son 100 Km².

Se hace una prueba desde la página web de *Digitalglobe* un rectángulo con un posible área de estudio. Se pone en el filtro que presente las imágenes correspondientes a las fechas comprendidas entre el 01 y el 31 de enero del presente año, por ser el mes de la zona de estudio para el 2.014.



Fig. 12. Cobertura de imágenes con DigitalGlobe. Enero 2.014

Se observa que existen imágenes procedentes del *GeoEye* y del *Ikonos* para esas fechas, pero existen partes de isla Livingston que quedan sin cubrir, en concreto la parte sureste, que podría complementarse por imágenes obtenidas en otros meses del año.

Otra opción para consultar imágenes de forma gratuita es mediante el programa Google Earth®. La compañía *Google* proporciona la visualización mediante satélites y permite la visualización de archivos en formato “.kmf” y “.kmz”. Las imágenes que se visualizan en Google Earth® tienen diferente resolución. Concretamente en la zona de estudio, existen áreas con alta

resolución y otras con resoluciones medias como la del LANDSAT. El problema es que Google Earth® presenta la imagen con mayor calidad de la zona, no la más moderna, y aunque permite seleccionar otra fecha, no permite tratamiento de imágenes digitalmente.

En la Fig. 13 se visualiza a través de Google Earth® la zona donde se encuentra ubicada la Base Juan Carlos I obtenida en el año 2010 con satélites de alta resolución proporcionada por *DigitalGlobe* y al este de la misma una zona con imágenes de resolución media proporcionada por el *US Geological Survey*. Se aprecia el detalle de los tejados de los hangares, que es imposible visualizar con una resolución media.

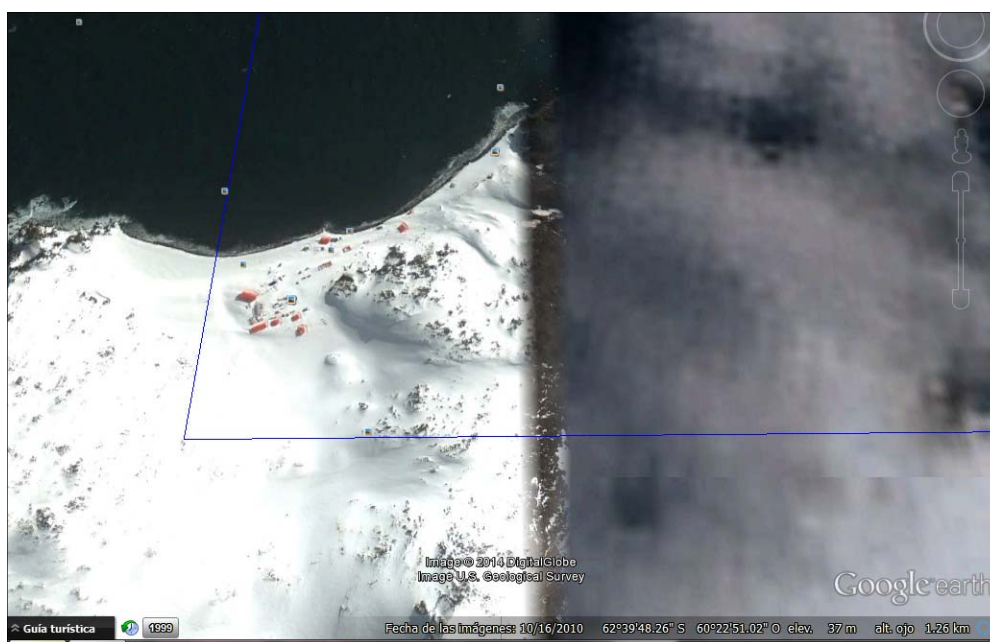


Fig. 13. Imagen de Google Earth

6. METODOLOGÍA

Se pretende determinar el retroceso glaciar ocurrido en Isla Livingston en la Antártida y obtener las variaciones que la línea de costa ha sufrido en los últimos 26 años mediante imágenes satélites, para que éstas puedan servir de apoyo en las actualizaciones cartográficas del IHM.

Los cálculos se realizarán a partir de los programas ERDAS® y ArcGIS®.

Se han elegido imágenes de satélite de tres épocas, todas del mes de enero en pleno verano austral. La primera de ellas con una fecha donde se produjeron las primeras expediciones españolas a la Antártida en los años 80, concretamente en enero del 1988. La segunda en un año intermedio entre el año 88 y el año presente. El año elegido ha sido el 2005 debido a que las imágenes del 2000 al 2004 de la zona carecían de visibilidad por la alta cobertura de nubes. La última de las imágenes corresponde al 2014.

La imagen del año 88 procede de una imagen tomada por el satélite LANDSAT 5, la del año 2005 fue tomada por el LANDSAT 7, y la del presente año está tomada por el LANDSAT 8.

La imagen del LANDSAT 8 se trata de tal forma que se compone con las mismas bandas del LANDSAT 5 para su mejor manejo y las tres imágenes se recortan en la zona de estudio.

Las imágenes se encuentran georreferenciadas, las dos primeras en proyección polar estereográfica WGS-84, y la tercera en UTM Huso 20 S WGS-84.

Para determinar el retroceso sufrido por los glaciares a partir de imágenes de satélite existen varios métodos propuestos por diferentes autores, aunque no hay ninguno que sea especialmente efectivo para una zona determinada. Además, hay que señalar que la mayoría de ellos no están precisamente enfocados a la obtención de la nieve y hielo en zonas polares.

Después de analizar los resultados, en todos los métodos que se describen a continuación las imágenes se volverán a recortar con un polígono que delimite la zona de Livingston para reducir los errores que se puedan cometer en cada una de las clasificaciones. Las capas resultantes se reclasificarán con 1 a los píxeles que forman la parte terrestre y con 0 a los que forman la parte de agua y la capa del año 1988 se restará a la capa del año 2014, de tal forma que el retroceso lo representarán los píxeles que se correspondan con el valor 1.

El primero de los métodos se realizará paso a paso, y posteriormente se creará un modelo con el “*Model Builder*” de ArcGIS® para acelerar los cálculos.

Primeramente se procederá a realizar una clasificación supervisada de las imágenes, que servirá para la obtención de un primer resultado.

El siguiente método es una de las metodologías más ampliamente usadas en la determinación de la cubierta nival mediante datos de teledetección, la propuesta por Dozier⁸. La nieve y el hielo poseen rasgos que las distinguen de otras cubiertas, las cuales se pueden observar a partir de la visualización de las distintas bandas de los sensores TM y ETM+. En las bandas del visible se pueden apreciar que las zonas nevadas poseen una alta reflectancia comparadas con las zonas circundantes no nevadas, pudiéndose distinguir los glaciares de las zonas con vegetación o del agua, pero no se pueden distinguir de las rocas desnudas, mientras que en la banda del infrarrojo cercano y medio la reflectancia del hielo y del agua disminuye, distinguiéndose de las zonas de roca desnuda y la de las nubes sigue siendo alta⁹.

⁸ Dozier, J. (1989) “*Spectral signature of alpine snow cover from the Landsat Thematic Mapper*”. Remote sensing of environment núm. 28, pág 9 - 22.

⁹ Alonso, C. y Moreno, V. (1969). “*Análisis multitemporal de imágenes LANDSAT TM en la cartografía de las masas de hielo y nieve aplicada a la modelización hidrológica*”. Revista de Teledetección núm 7. Diciembre, 1996.

La metodología de Dozier propone el cálculo de un índice normalizado usando el canal 2 (0,520-0,6 μm), y el canal 5 (1,550-1,750 μm) del satélite LANDSAT con sensor TM, atendiendo de esta forma a que la nieve en el espectro visible es muy reflexiva, siendo al contrario en el infrarrojo medio.

$$\text{NDSI} = (\text{canal 2} - \text{canal 5}) / (\text{canal 2} + \text{canal 5})$$

Del resultado obtenido, Dozier propone que se trate como cubierta nival cualquier celda que sea superior a un valor de 0,4 del índice NDSI (Normalized Difference Snow Index).

Este valor que propone Dozier se considera una orientación, puesto que el valor del “*ndsI*” depende de múltiples factores, como puede ser el ángulo de elevación solar y las condiciones atmosféricas, así que mediante el tratamiento de las imágenes resultantes de la aplicación de este índice, se determinarán los intervalos para los cuales se diferencian los diferentes tipos de suelo.

La tercera y cuarta metodología empleada es la caracterización de las masas de hielo glaciar a través de la relación entre las bandas 3 y 5 o la 4 y 5 del LANDSAT TM.

El “*Ratio imagen 3/5*” es un excelente indicador de nieve y hielo y el más efectivo índice para la discriminación de nieve o hielo en regiones de sombras, tierra o roca¹⁰. Según Rott¹¹, el umbral donde $\text{TM3/TM5} > 1,3$ se considera nieve/hielo.

Hall y otros¹² definieron el “*ratio imagen 4/5*” para la diferenciación de nieve y hielo, y Jacobs y otros¹³ emplearon el umbral $\text{TM4/TM5} > 1$ para aquellos píxeles que fuesen nieve o hielo. Este ratio es especialmente útil en la eliminación de las variaciones de intensidad causadas por las sombras (Gao y Liu, 2001)¹⁴.

El último de los métodos a utilizar va a ser la digitalización manual. En este caso se digitalizará la línea de costa de los años 1988 y 2014 y se calculará la superficie desaparecida de glaciar a partir de las líneas digitalizadas.

¹⁰ Vargas Gonzáles, C., Villón Reinoso, C., Pasapera Gonzáles, J. (2009) “*Comparación de técnicas para el mapeo de cobertura glaciar con imágenes LANDSAT y ASTER en la Cordillera Blanca, Ancash, Perú*”. Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal, Brasil, 25-30 abril, Pág. 6911-6917.

¹¹ Rott, H (1994). “*Thematic studies in alpine areas by means of polarimetric SAR and optical imagery*”. Advances in Space Research núm. 14, pág. 217 - 226.

¹² Hall, D.K., Ormsby, J.P., Bindshadler, H. y Siddalingaiah, H. “*Characterization of snow and ice reflectance zones on glaciers using Landsat TM data*”. Annals of Glaciology núm. 9, pág. 104-108.

¹³ Jacobs, J. D., Simms, E. L. y Simms, A. “*Recession of the southern part of Barnes Ice Cap, Baffin Island, Canada, between 1961 y 1993, determined from digital mapping of Landsat TM*”. Journal of Glaciology núm. 43, pág. 98 - 102.

¹⁴ Fuentes J., Guillermo S. “*Principales aplicaciones de los sensores Thematic Mapper(TM) y Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) de LandSat para el estudio de glaciares*”.

Un tratamiento adicional a las imágenes sería aplicar una máscara de aguas en la zona terrestre si se dispusiese de un modelo digital del terreno, de tal forma que las superficies con agua quedasen eliminadas de los cálculos.

7. PROCEDIMIENTO Y RESULTADOS.

7.1. Reconocimiento del terreno.

Para el tratamiento de las imágenes de satélite se utilizan principalmente las combinaciones de bandas 542 y 342 del sensor TM. Se escoge la imagen del año 2014, y con la primera combinación de bandas aparecen las zonas de tierra en tonos rojos, mientras que las zonas de nieve en tonos azules. En estas latitudes apenas se va encontrar variabilidad en los tipos de superficie. Se va a identificar suelo desnudo, nieve, hielo (“*brass*”), nubes y mar.

Si se hace una aproximación, se puede observar el fenómeno producido conocido como “*brass*”, que son trozos de hielo que se han desprendido de los glaciares en Bahía Sur y Bahía Walker (Fig. 14). Este fenómeno se produce por la acción de las olas al chocar contra el glaciar. Cuando el viento sopla del SW produce un continuo desgaste del glaciar, de manera que cuando el viento cambia al NE, estos trozos de hielo son empujados hacia el mar, cubriendo su superficie de hielo.



Fig. 14. Livingston con combinación 542 (2014). Fuente: Elaboración propia

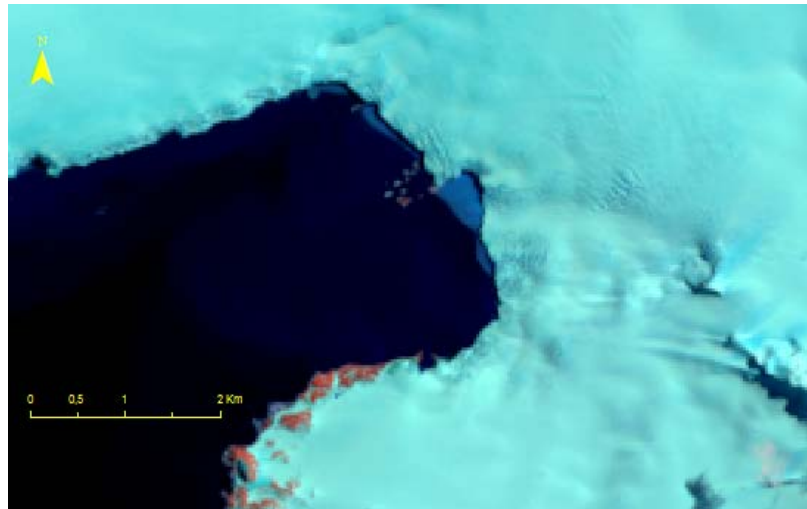


Fig. 15. Bahía Sur (2014) con combinación 542. Fuente: Elaboración propia

La zona de hielo parece visualizarse de una manera más clara con la combinación 342, en la que aparecen las zonas hielo con tonos morados y la nieve en tonos blancos, aunque la diferenciación entre el mar y la tierra se aprecia peor.

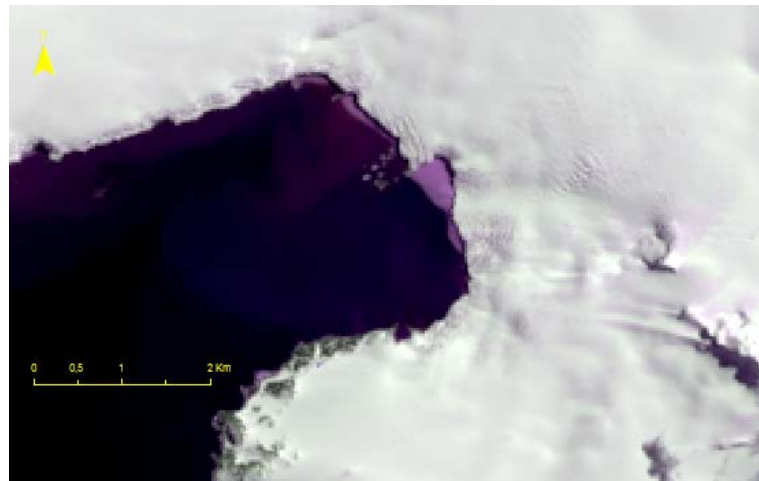


Fig. 16. Bahía Sur (2014) con combinación 342. Fuente: Elaboración propia

Si se visualiza esta misma zona con la banda pancromática el resultado es el siguiente:

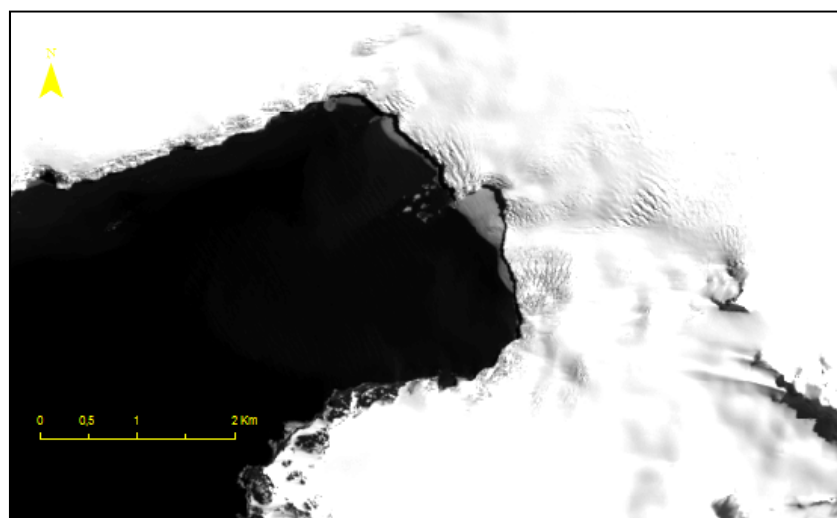


Fig. 17. Bahía Sur (2014) en banda pancromática. Fuente: Elaboración propia

La calidad de la imagen ha mejorado considerablemente, así que para obtener esta calidad y poder visualizar la imagen con una combinación de bandas que permita distinguir las zonas de hielo y tierra, se procede a la combinación de la banda pancromática con la imagen 2014 con 7 bandas, como en el sensor TM, con el que se obtiene el resultado de la Fig. 18.

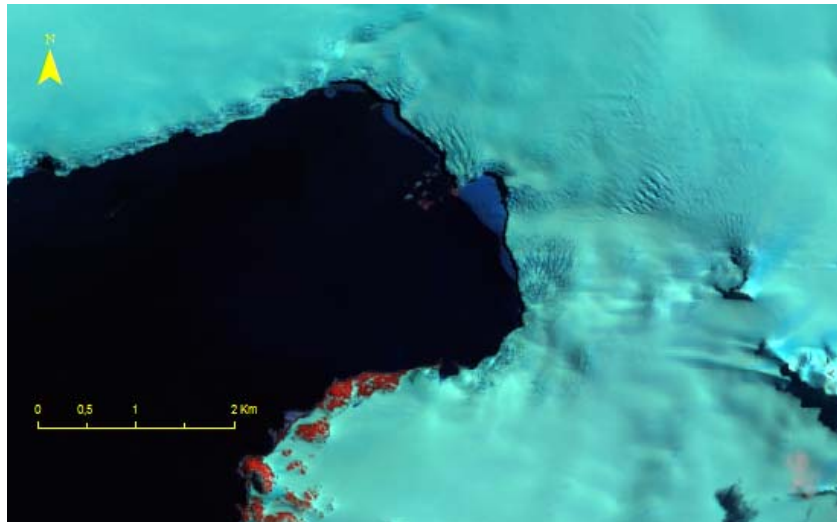


Fig. 18. Mezcla de la escena con 7 bandas y la escena de banda pancromática.
Bahía Sur (2014) Fuente: Elaboración propia

Se va a hacer un primer reconocimiento visual del terreno en distintas zonas de la isla. Primeramente se va a analizar la parte oeste, la Península de Byers. Destaca la zona de suelo desnudo en tonos rojizos y la cubierta nival en tonos azules. El mar aparece oscuro, prácticamente negro y sobre él, al norte de la isla aparece el oleaje producido por el mar al chocar contra las pequeñas islas que conforman la costa norte.

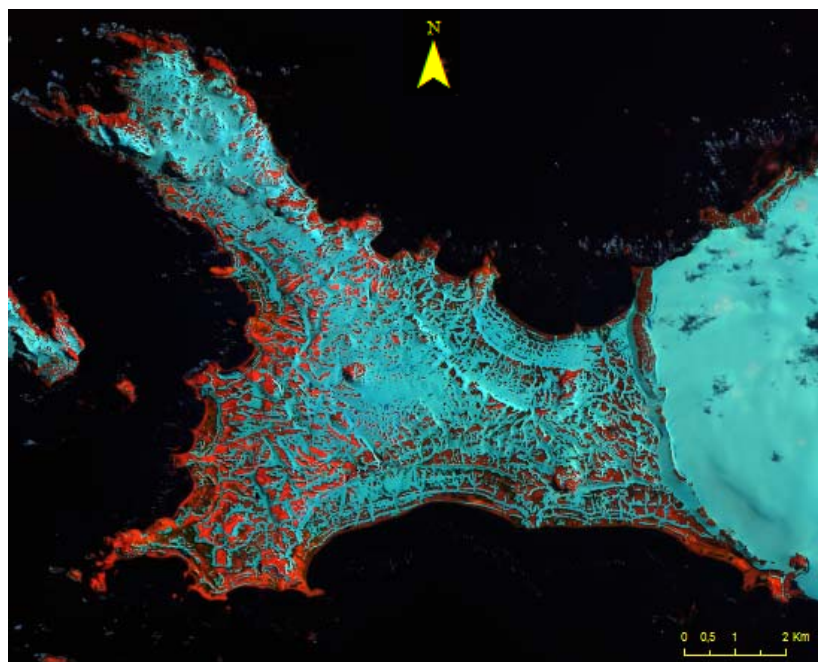


Fig. 19. Península de Byers (2014). Fuente: Elaboración propia

El sur de la parte de central es una zona de especial interés al ser donde se ubica la Base Juan Carlos I. Como ya se ha mencionado, destaca el fenómeno conocido como “brass” en Bahía Walker y Bahía Sur.

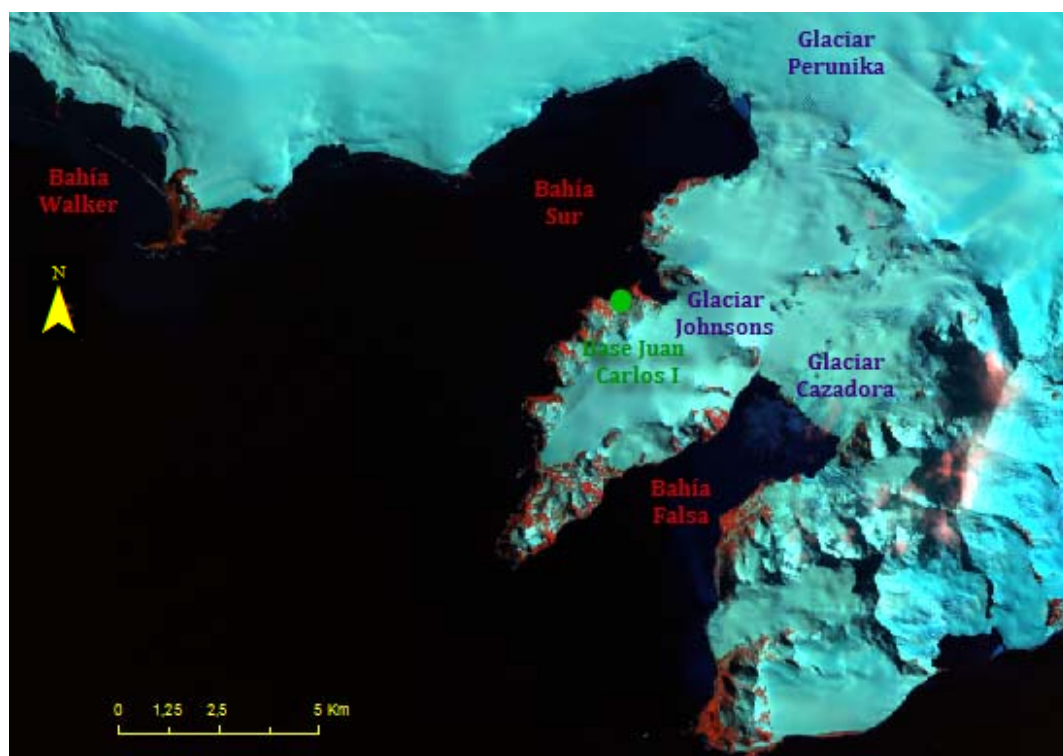


Fig. 20. Ubicación de la Base Juan Carlos I. Fuente: Elaboración propia

En la parte sureste de Livingston destaca la cadena montañosa que se extiende de este a oeste, conocida como las montañas Tangra, que en su parte más occidental se encuentra cubierta por algunas nubes. Destacan al sur los glaciares Macy y Magura.

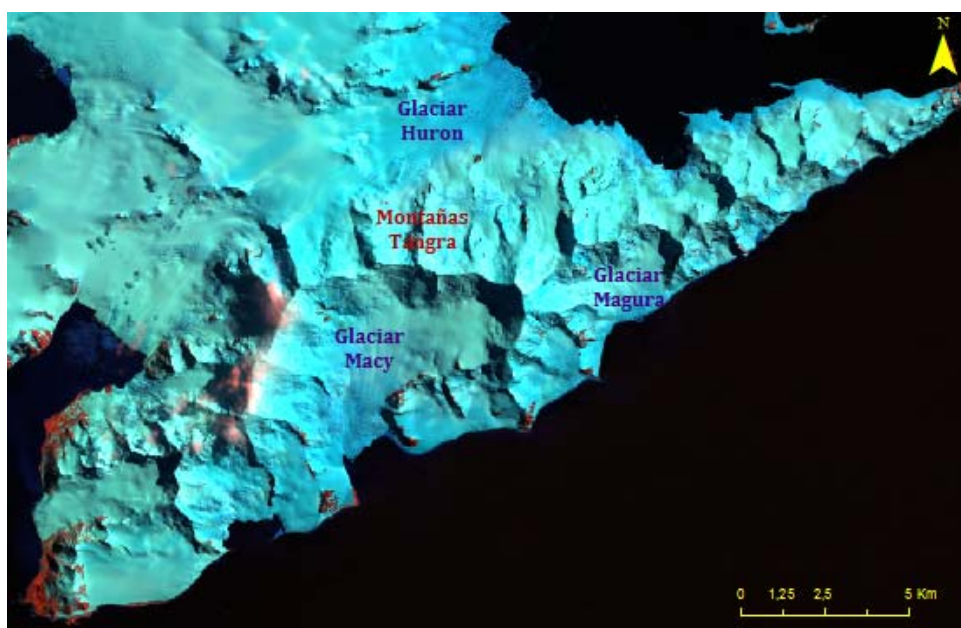


Fig. 21. Parte SE de Livingston, montañas Tangra (2014). Fuente: Elaboración propia

La parte este de Livingston se encuentra prácticamente cubierta en su totalidad de nieve-hielo. Esta parte está formada por tres glaciares, principalmente.

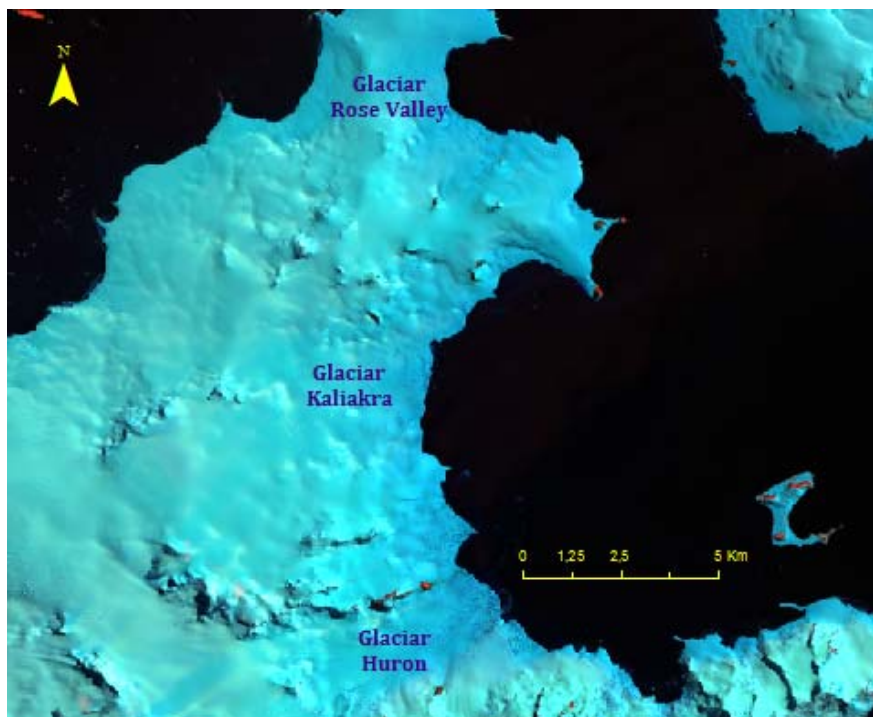


Fig. 22. Parte E de Livingston, Bahía de la Luna (2014). Fuente: Elaboración propia

Ahora se va a analizar la imagen del año 1988 en el entorno de ArcGIS®. El marco de datos se va a establecer en proyección UTM 20S WGS-84. Esta imagen, de peor calidad que la de 2014, se encuentra cubierta con nubes, lo que dificultará el análisis digital de la imagen.

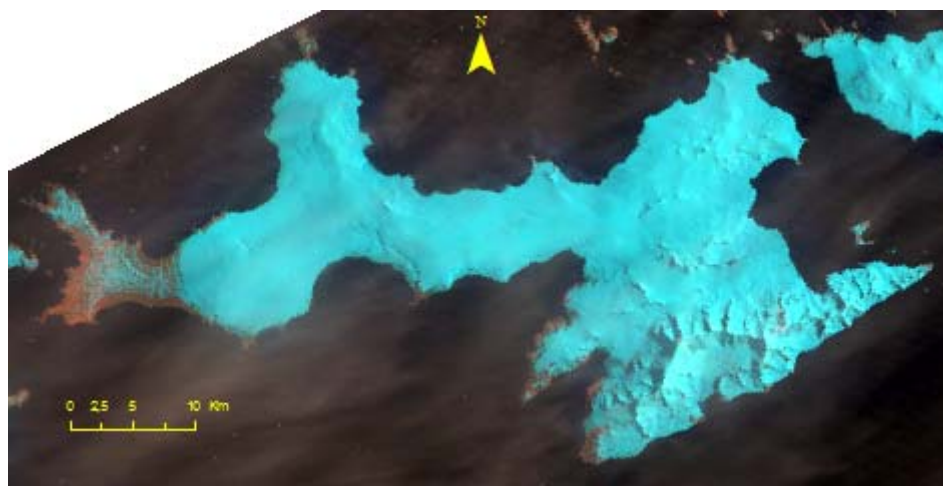


Fig. 23. Imagen de Livingston del año 1988 con combinación 542. Fuente: Elaboración propia

Se va a superponer con la imagen del año 2014 para observar las posibles variaciones de la línea de costa en las zonas donde existe glaciar, y se observa primeramente que una de las dos imágenes está mal georreferenciada, puesto

que no coincide la línea de costa, ni siquiera en las zonas donde no existe glaciar, como ocurre en la Península de Byers (Fig.24).

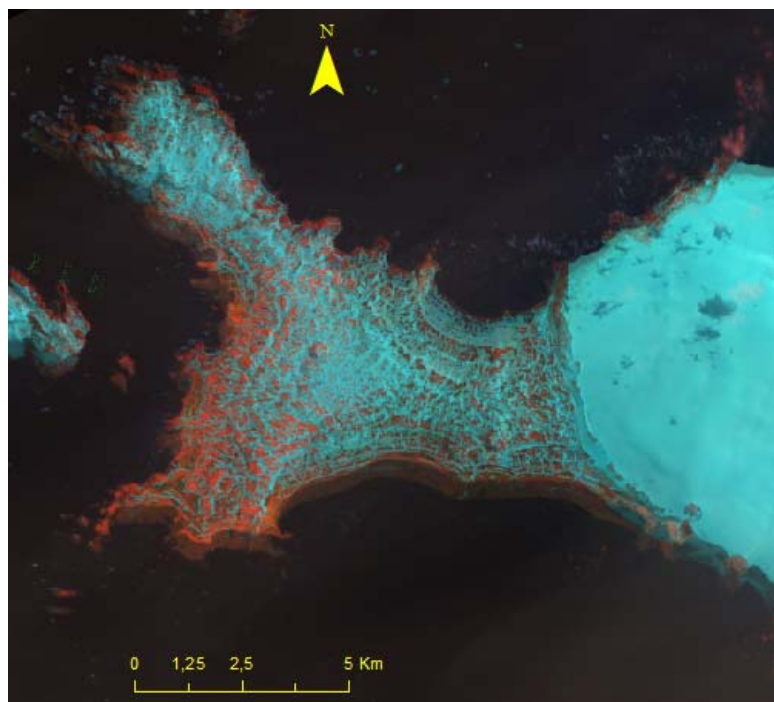


Fig. 24. Imágenes superpuestas del año 1988 y 2014 en la zona de la Península de Byers. Fuente: Elaboración propia

Haciendo las comprobaciones pertinentes con la cartografía existente, se obtiene que la imagen del año 1988 es la que está mal georreferenciada, por lo que ésta se volverá a georreferenciar correctamente, y para que ambas imágenes, 2014 y 1988 se encuentren en la misma proyección, la nueva georreferenciación se hará en coordenadas UTM 20S WGS-84.

Una vez realizada la digitalización se vuelven a superponer las imágenes de los dos años y se compara la diferencia existente en ambas líneas de costa.

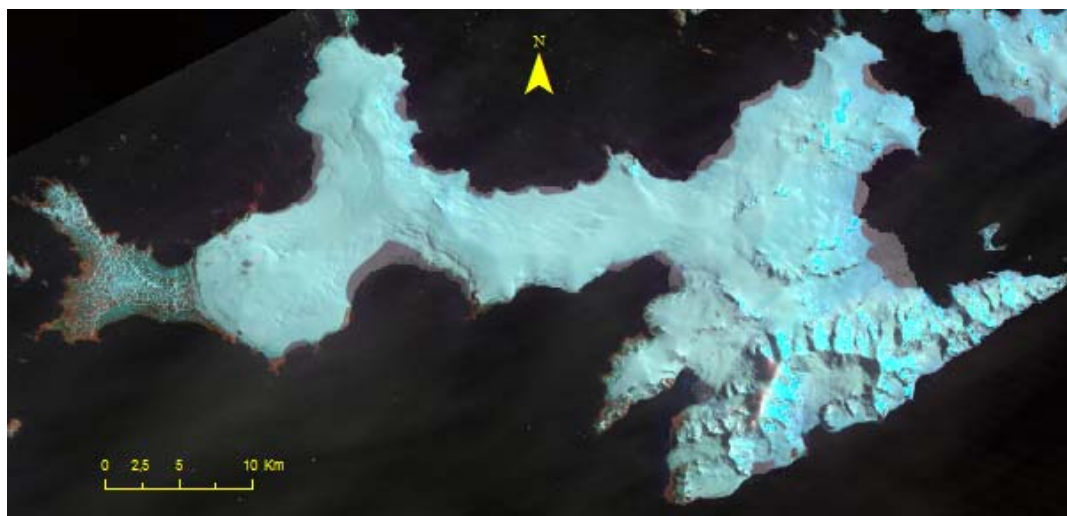


Fig. 25. Superposición de imágenes del año 1988 y 2014 en Livingston. Fuente: Elaboración propia

Se puede apreciar a simple vista que la línea de costa en la zona de glaciares es distinta en cada una de las escenas. Y en la zona este de la isla, el glaciar Huron ha llegado a retroceder hasta 2,5 Km.

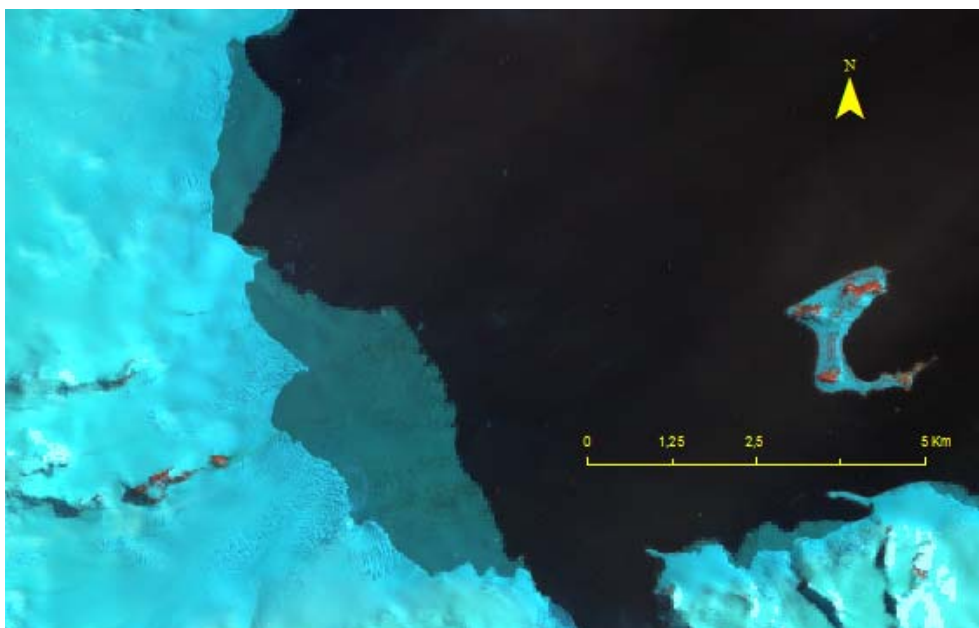


Fig. 26. Retroceso del Glaciar Huron. Escenas superpuestas 1988-2014. Fuente: Elaboración propia

También se advierte la variación en los glaciares Cazadora y Perunika en Bahía Falsa y Bahía Sur, respectivamente (Fig.27), y en el glaciar Verila en Bahía Walker (Fig.28).

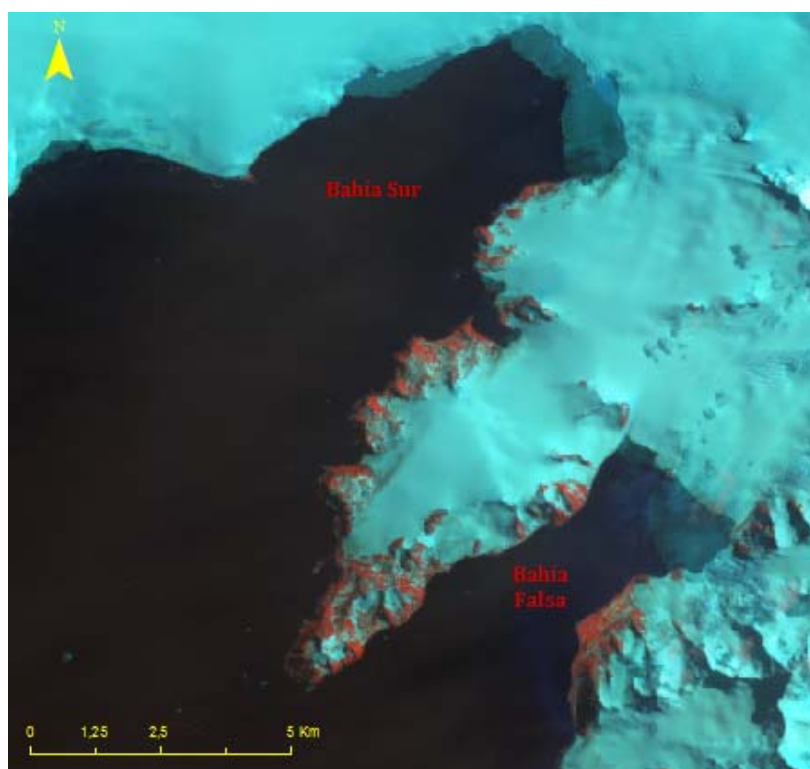


Fig. 27. Retroceso glaciar en Bahía Sur y Bahía Falsa. Escenas superpuestas 1988-2014
Fuente: Elaboración propia

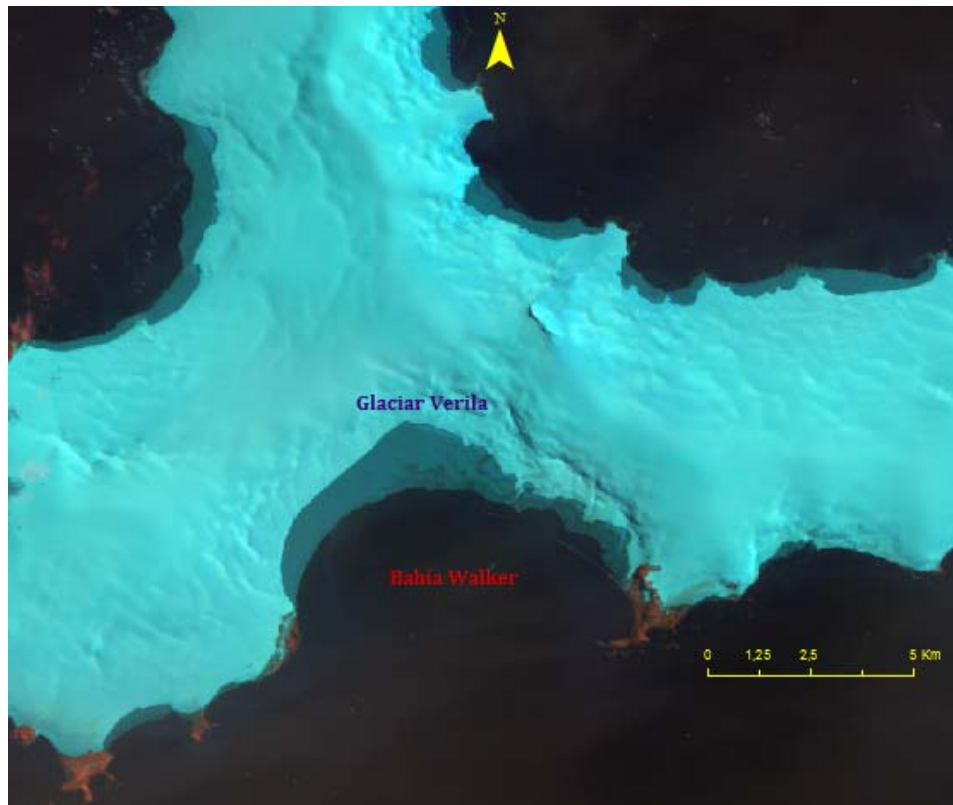


Fig. 28. Retroceso glaciar en Bahía Walker. Escenas superpuestas 1988-2014. Fuente: Elaboración propia

También se localiza alguna zona donde en vez de un retroceso el glaciar ha producido un pequeño avance, todas en zonas rodeadas por montañas de glaciar donde el peso de la nieve puede haber producido su caída y por tanto su acumulación en esas zonas. Concretamente en el glaciar Macy y en la Península Burgas, al este de Livingston, en los glaciares Ropótamo e Iskar.



Fig. 29. Extensión del glaciar Macy. Escenas superpuestas 1988-2014. Fuente: Elaboración propia

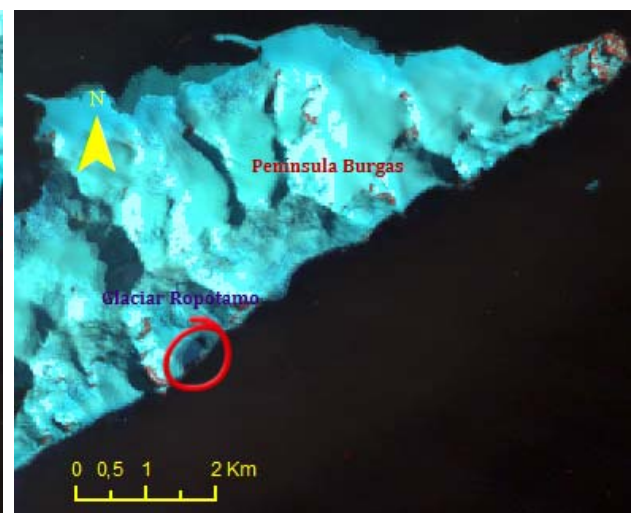


Fig. 30. Extensión del glaciar Ropótamo. Escenas superpuestas 1988-2014. Fuente: Elaboración propia

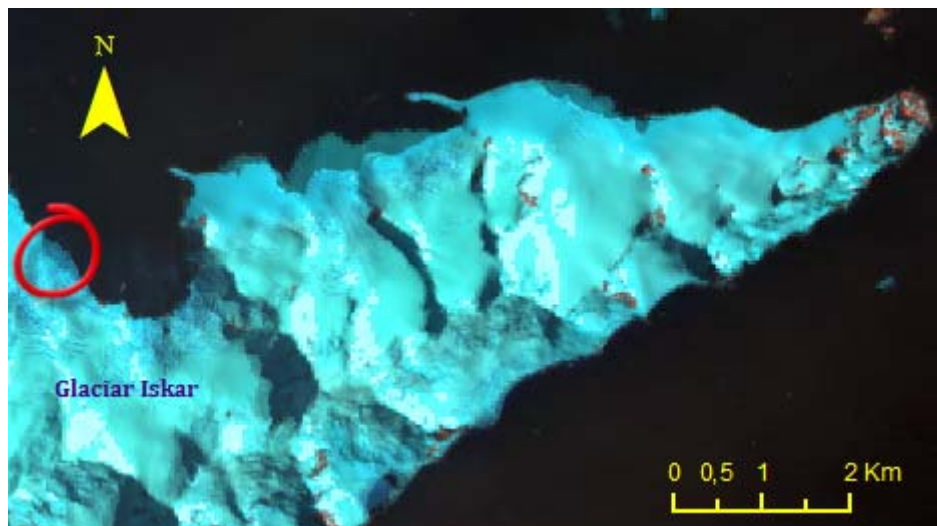


Fig. 31. Extensión del glaciar Iskar. Escenas superpuestas 1988-2014. Fuente: Elaboración propia

Para comprobar si este retroceso ha sido gradual a lo largo de los años, se vuelven a comparar las imágenes con un año intermedio, 2005.

Para obtener una mejor visualización y resolución de la imagen del 2005, se mezcla la imagen con las 7 bandas de resolución 30 metros con la banda 8 pancromática, tal como se hizo con la imagen de 2014.

Uno de los métodos a utilizar posteriormente para determinar la superficie glaciar retrocedida es la digitalización manual, por tanto se digitalizarán las líneas de costa del año 1988 y la del 2014, de momento para visualizar de manera más clara el retroceso en el año intermedio 2005.

La digitalización va a realizarse obviando las pequeñas islas que se encuentran alrededor de Livingston, puesto que con la resolución de 30 metros proporcionada con el sensor TM no se puede realizar una digitalización más precisa.

Puesto que la escena del año 2014 presenta una resolución mayor que la del año 1988 debido a su banda pancromática, se va a realizar primero la digitalización de la línea de costa en el año 2014, y a partir de ella se digitalizará la de 1988, modificando únicamente las zonas donde ha habido variaciones para minimizar los errores de digitalización del operador.

En naranja aparece la línea de costa de 2014, y en verde la de 1988. A simple vista se observa que los cambios más significativos han tenido lugar durante los años anteriores a 2005. Son la zona del este de Livingston, en la Bahía de la Luna (Fig. 34), y el glaciar de Bahía Falsa (Fig.33) donde se aprecian grandes cambios en los años posteriores.

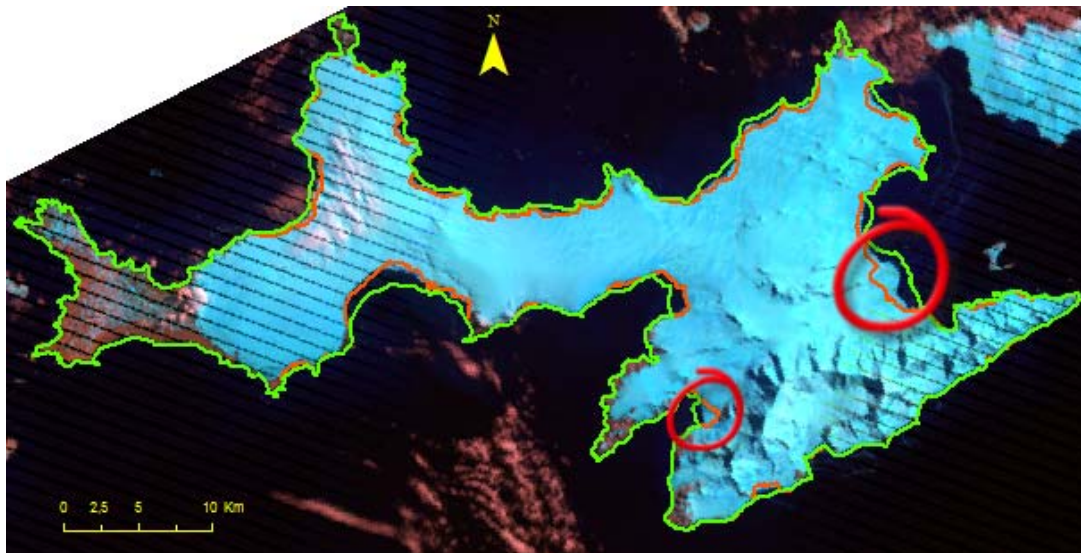


Fig. 32. Livingston en el año 2005 con combinación 542. Fuente: Elaboración propia

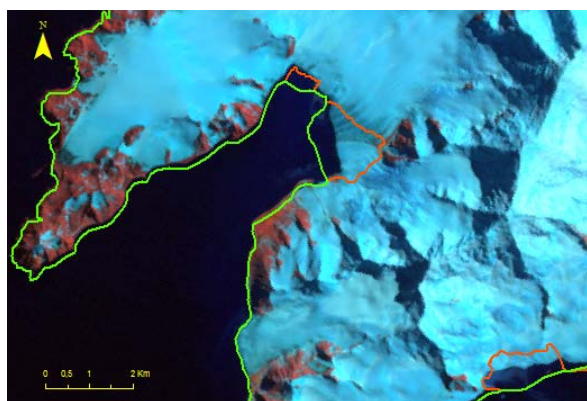


Fig. 33. Bahía Falsa en el año 2005
Fuente: Elaboración propia

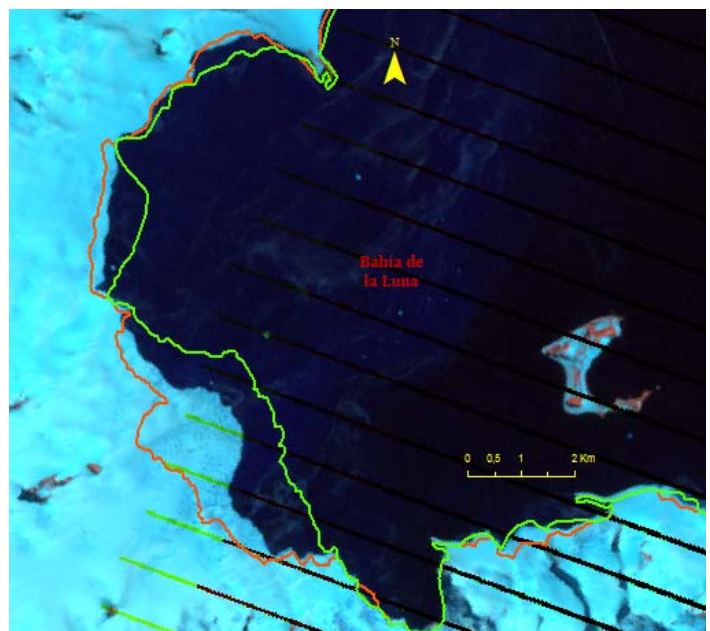


Fig. 34. Bahía de la Luna en el año 2005
Fuente: Elaboración propia

7.2. Clasificación supervisada.

Una vez comprobada la existencia de un retroceso glaciar, se van a emplear varios métodos para determinar la superficie glaciar desaparecida. Primeramente se va a realizar una clasificación supervisada por mínima distancia de ambas imágenes mediante el programa ERDAS®. Los diferentes tipos de suelo a determinar serán agua, suelo desnudo, nieve, hielo y sombra. El resultado de esta clasificación supervisada para el año 2014 es el siguiente:

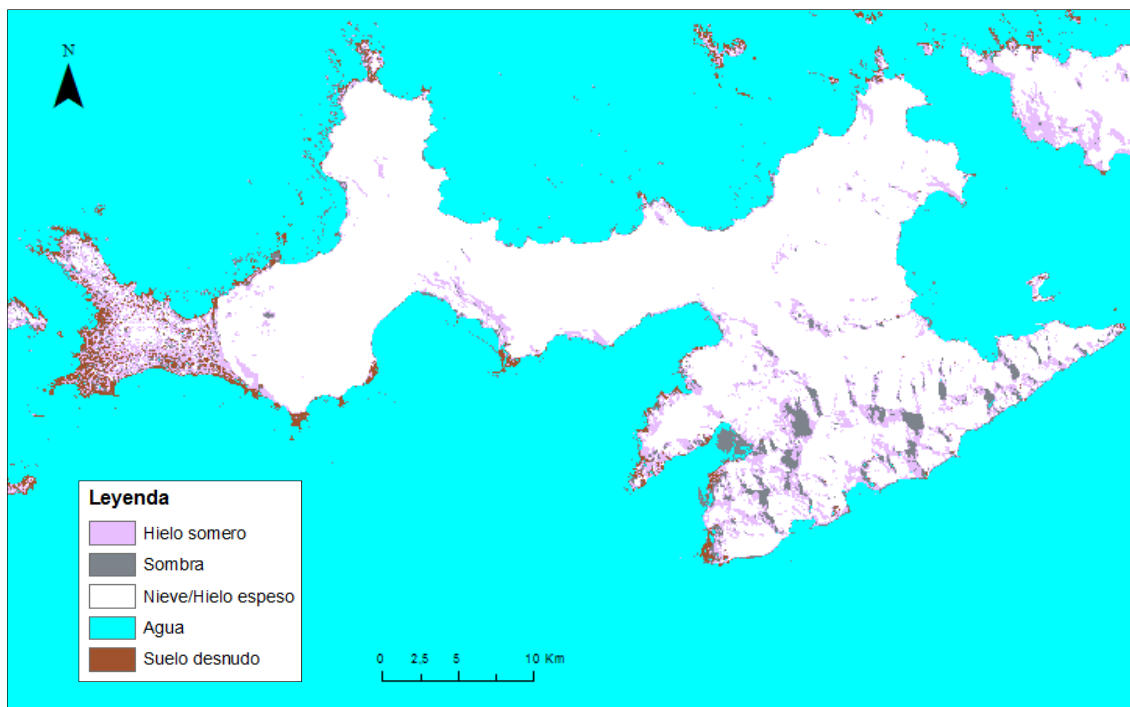


Fig. 35. Clasificación supervisada 2014. Fuente: Elaboración propia

Se observa la clasificación bastante precisa en la zona de Bahía Sur (Fig.36). Y la zona de sombras existente en la zona de las Montañas Tangra de isla Livingston (Fig. 37).

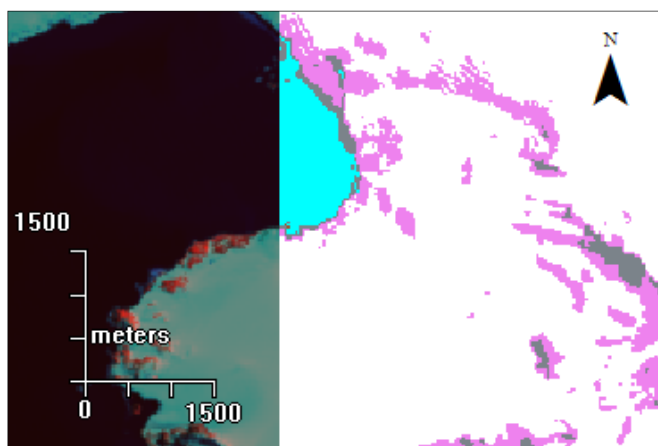


Fig. 36. Clasificación supervisada en Bahía sur (2014)
Fuente: Elaboración propia

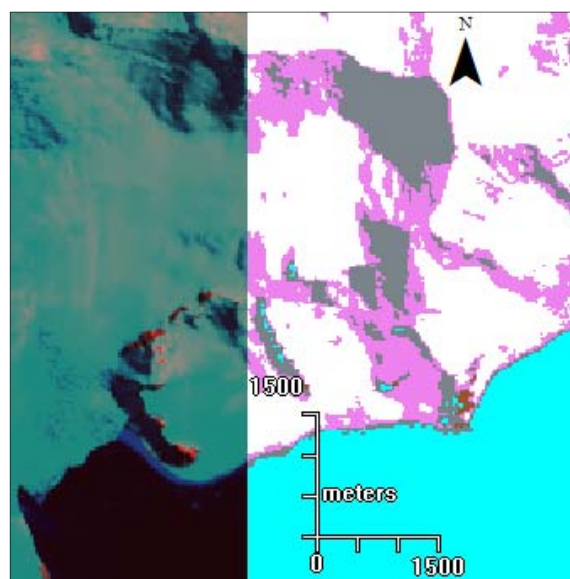


Fig. 37. Clasificación supervisada en las Montañas Tangra (2014)
Fuente: Elaboración propia

La zona de Bahía Falsa parece presentar zonas pegadas a la costa donde el mar parece mezclado con hielo, y donde el programa las ha clasificado como sombras. Se comprueba de esta forma que la separación entre sombra y hielo no llega a determinarse perfectamente (Fig. 38).

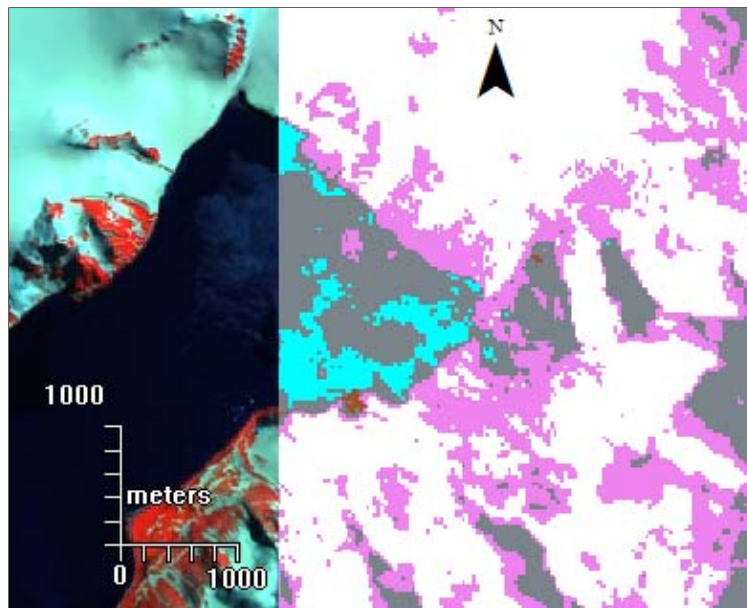


Fig. 38. Clasificación supervisada en Bahía Falsa (2014). Fuente: Elaboración propia

Se hace lo mismo con la imagen del año 88. Esta imagen es de peor calidad debido a la abundante presencia de nubes.

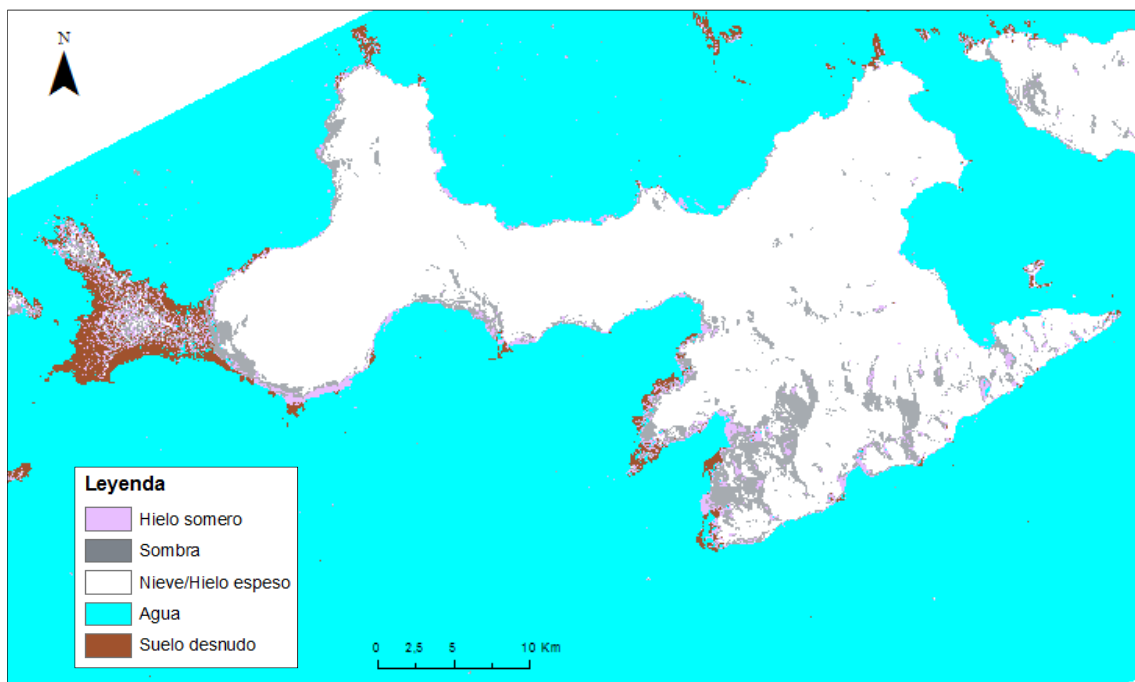


Fig. 39. Clasificación supervisada 1.988. Fuente: Elaboración propia

Esta clasificación está también bastante acertada, pero debido a la calidad de la imagen, en la Península de Hurd aparecen pequeñas zonas clasificadas como agua, cuando realmente forman parte de suelo desnudo o nieve (Fig. 40).

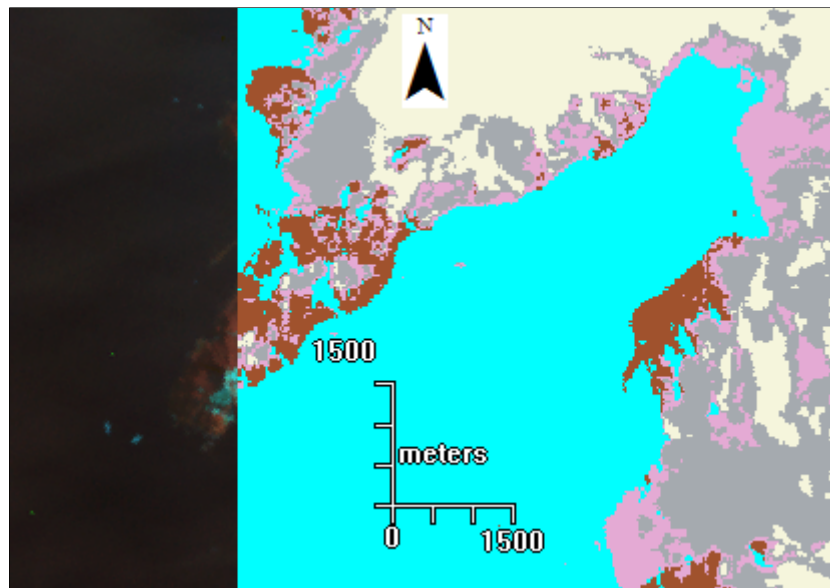


Fig. 40. Clasificación supervisada en la Península de Hurd (1.988)

Una vez realizada la clasificación supervisada de ambas imágenes, se va a crear una capa de polígonos con ArcGIS® con uno que rodee la isla. Esta capa se pasará a ráster con la misma resolución de 30 m de las imágenes LANDSAT y se recortarán las imágenes, para que cuando se realicen las operaciones entre capas se minimicen los errores al centrarse únicamente en la isla Livingston y dejar fuera las islas de alrededor.

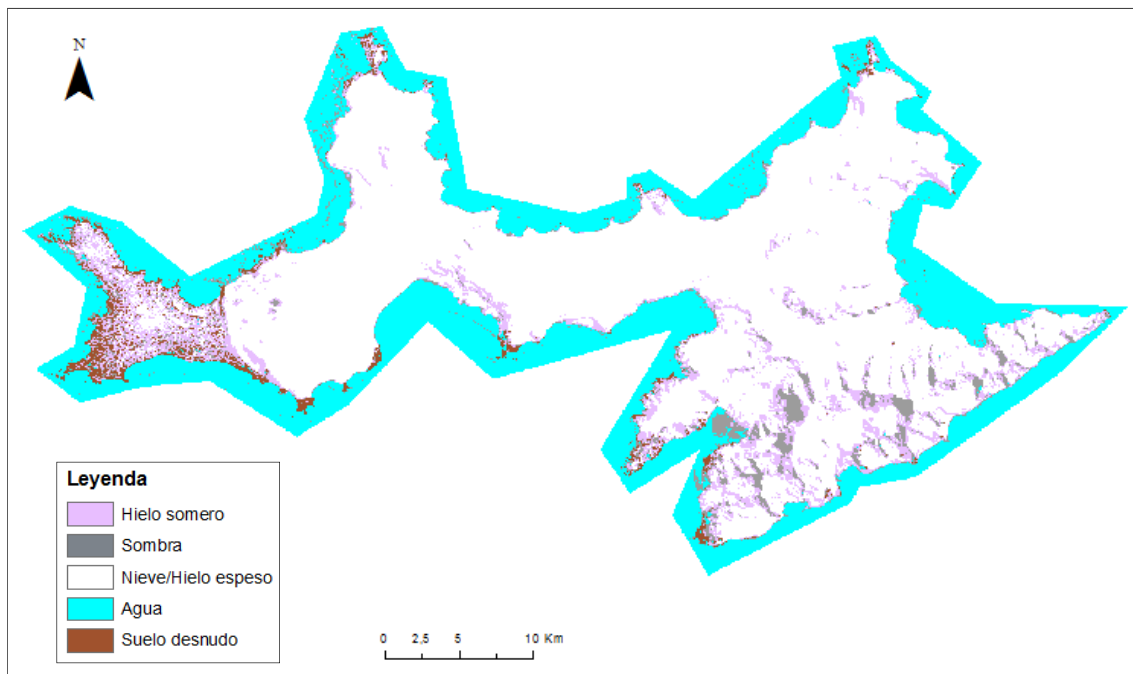


Fig. 41. Clasificación supervisada 2014 recortada. Fuente: Elaboración propia

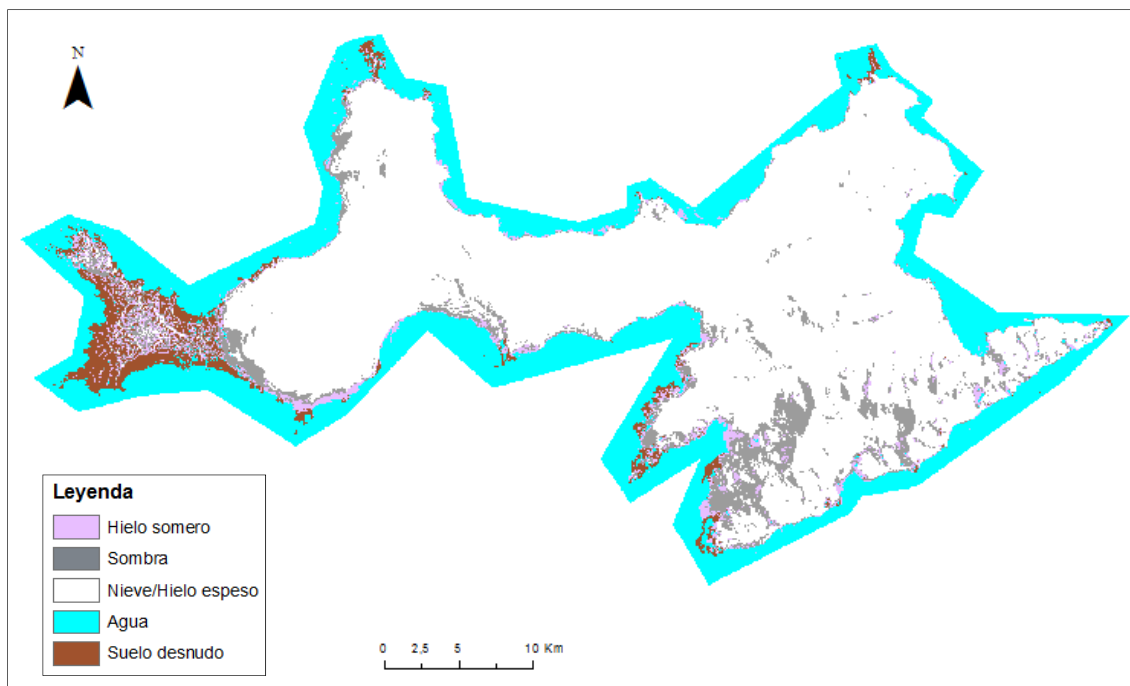


Fig. 42. Clasificación supervisada 1988 recortada. Fuente: Elaboración propia

El siguiente paso es reclasificar los valores de tal manera que la parte que no se corresponda con agua sea 1 y la que sí sea 0. Una vez reclasificadas ambas capas, se restará la capa del año 1988 a la de 2014, con el siguiente resultado.

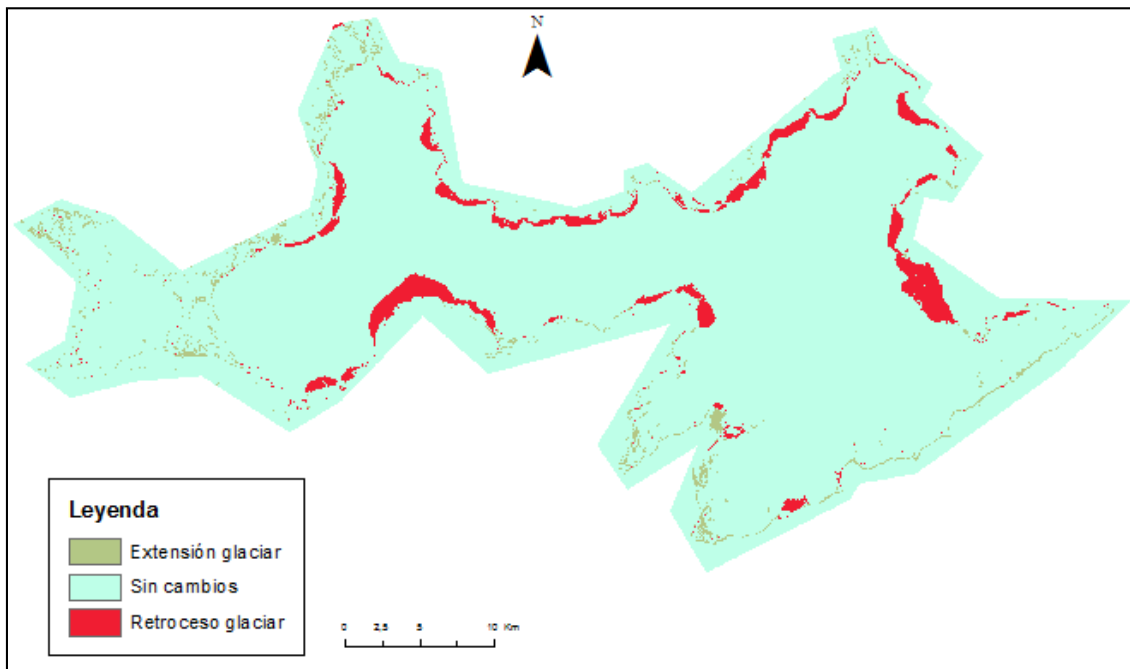


Fig. 43. Retroceso glaciar mediante clasificación supervisada. Fuente: Elaboración propia

El retroceso glaciar se visualiza perfectamente con los píxeles que han dado 1 como resultado. Los píxeles correspondientes a -1 son los que teóricamente han producido una extensión del glaciar, pero que aparte de las zonas que se identificaron anteriormente como tal, la mayoría aparece bordeando la línea de

costa, lo que sugiere que pueden ser pequeños errores de georreferenciación. Se aprecia en la zona de Bahía Falsa que aunque el retroceso es visualmente considerable, se ha identificado más como extensión (Fig. 43).

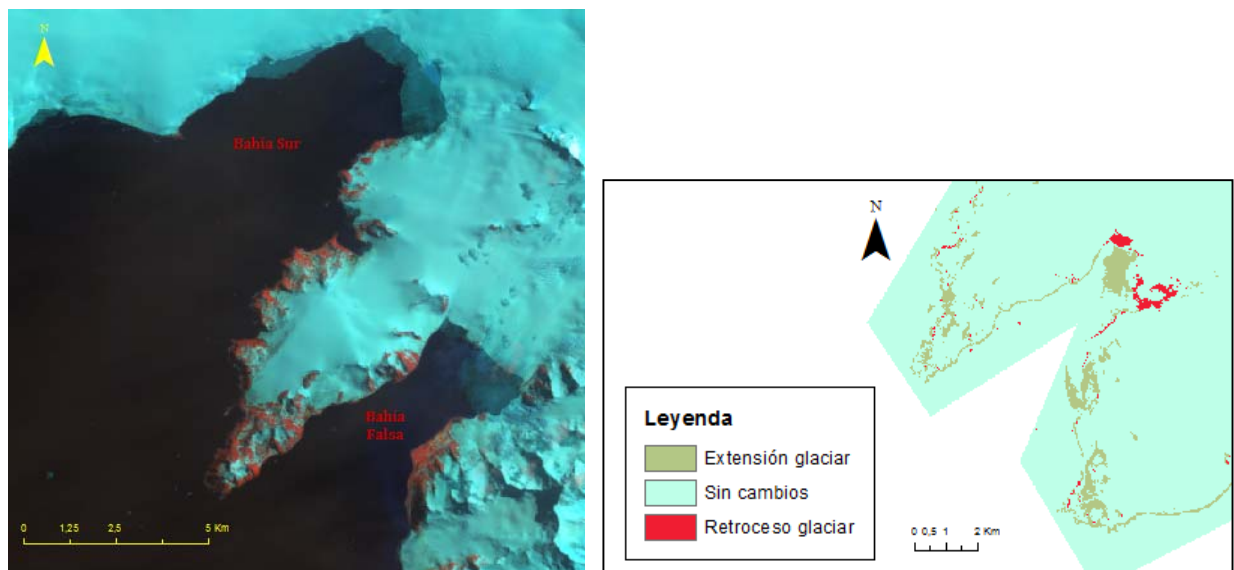


Fig. 43 Retroceso glaciar en Bahía Falsa. Fuente: Elaboración propia

El resultado es que hay **58.092 píxeles** clasificados como retroceso. Si cada píxel ocupa **900 m²**, los glaciares han retrocedido un total de **52 Km²**.

Puesto que este va a ser el proceso a seguir con los siguientes métodos, se va a crear un modelo con el “Model Builder” de ArcGis® para acelerar los cálculos.

Se han introducido como parámetros las capas de entrada y las intermedias para tenerlas clasificadas dentro de la carpeta correspondiente. También es un parámetro los intervalos de reclasificación, puesto que varían para cada análisis. La capa final resultante es la resta de la capa reclasificada del año 1988 menos la capa reclasificada del año 2014.

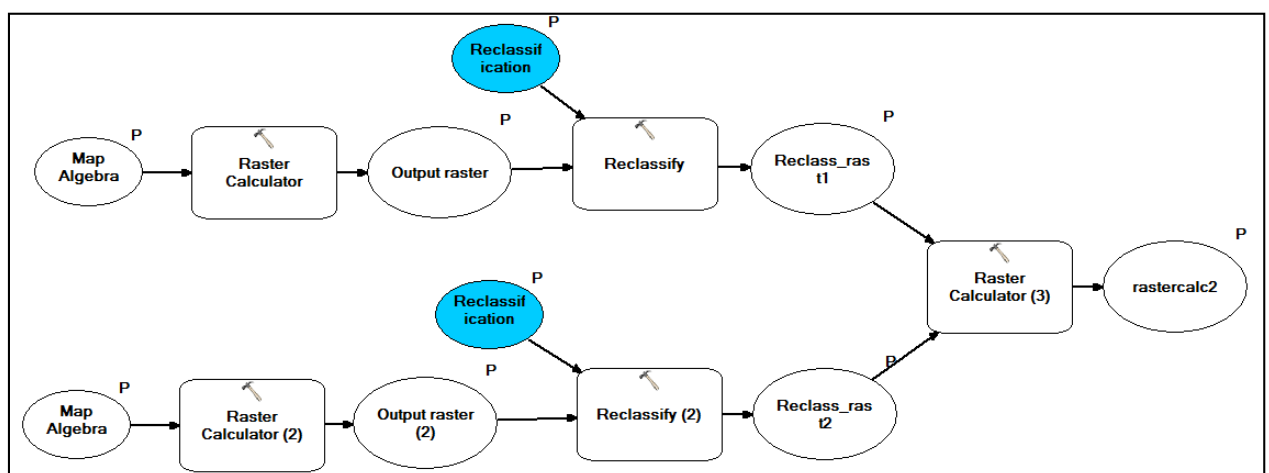


Fig. 44. Modelo creado con “Model Builder” de ArcGis®

7.3. NDSI.

El siguiente método a utilizar es mediante el “*nds*”. El cálculo del índice del “*nds*” se realiza mediante el programa ERDAS®. Se hacen los cálculos para cada una de las escenas y se tratan las escenas en pseudocolor con los siguientes intervalos de píxeles para cada año.

Valor	Superficie
-0,31 – 0,11	Suelo desnudo
0,11 – 0,30	Agua
0,30 – 0,42	Sombra
0,42 – 0,79	Nieve/hielo

Tabla 4. Valores “*nds*” 2014

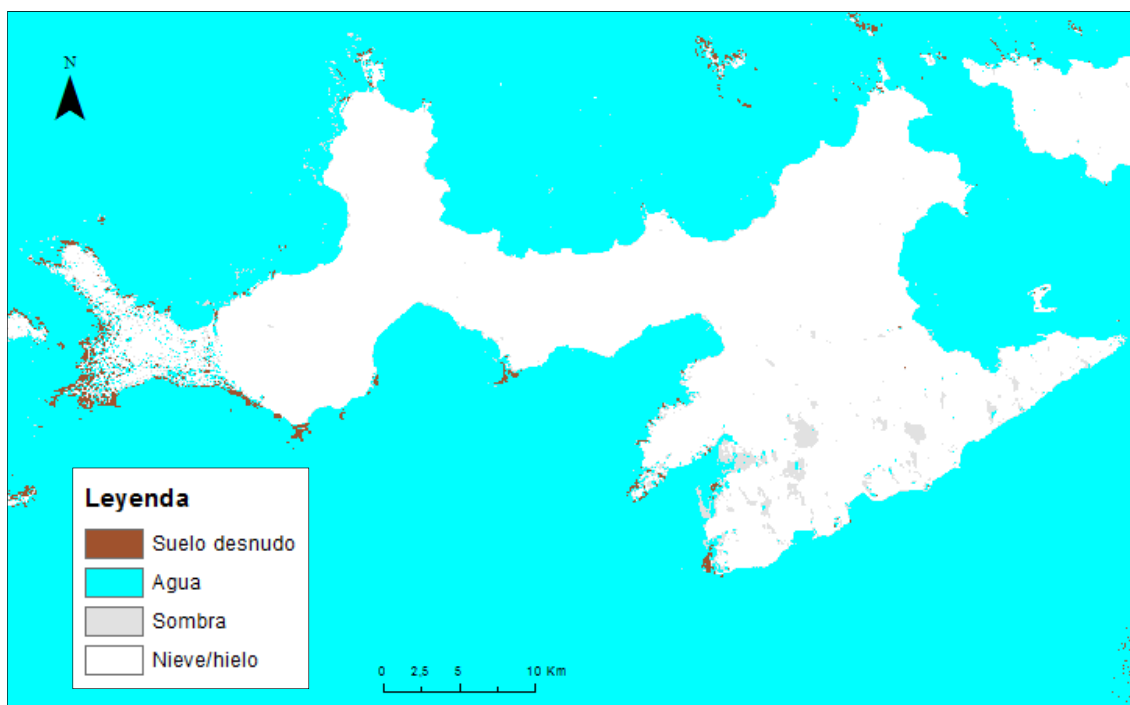


Fig. 45. “*Ndsi*” Livingston (2014). Fuente: Elaboración propia

Con esta clasificación, el mar se ve bien delimitado y las zonas de sombra coinciden con las zonas que se ven visualmente. Así como la zona de suelo desnudo situada en la península de Byers.

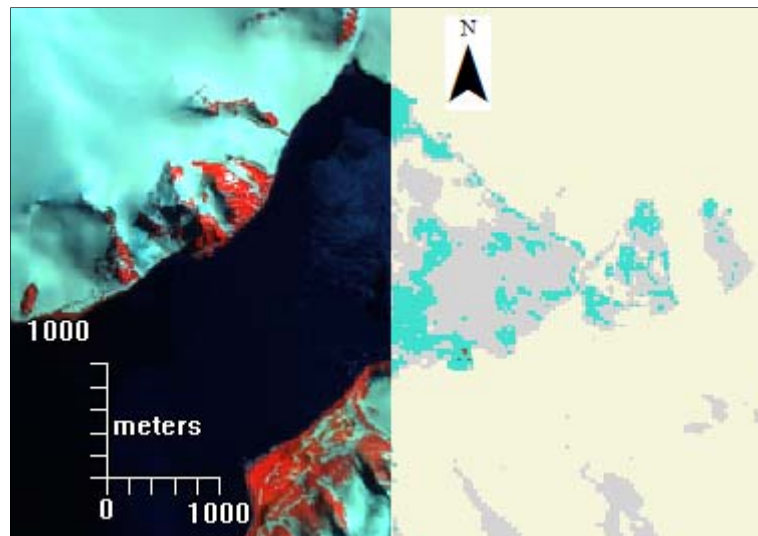


Fig. 46. “Ndsi” Bahía Falsa (2014). Fuente: Elaboración propia

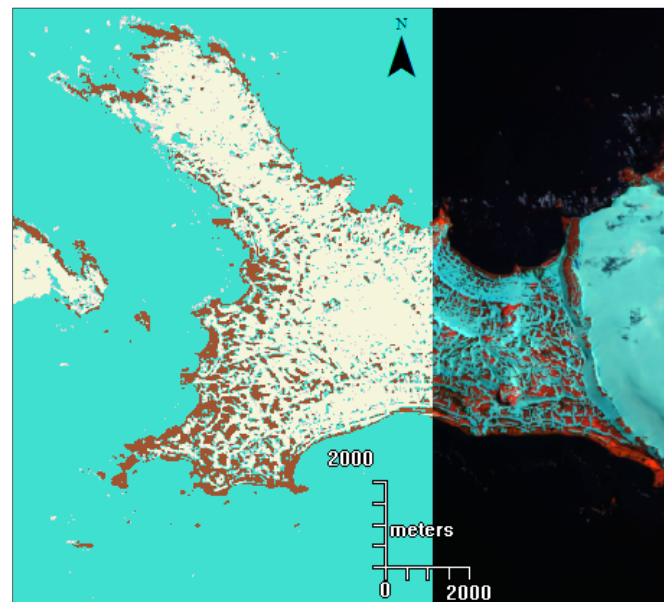


Fig. 47. “Ndsi” Península de Byers (2014). Fuente: Elaboración propia

Se repiten los mismos pasos con la imagen “*nds*” del año 1988. En esta ocasión se obtienen los siguientes intervalos de valores de los píxeles para cada tipo de superficie:

Valor	Superficie
-0,88 – 0,14	Suelo desnudo
0,14 – 0,54	Agua
0,54 – 0,62	Sombra
0,62 – 0,94	Nieve/Hielo

Tabla 5. Valores “*nds*” 1988

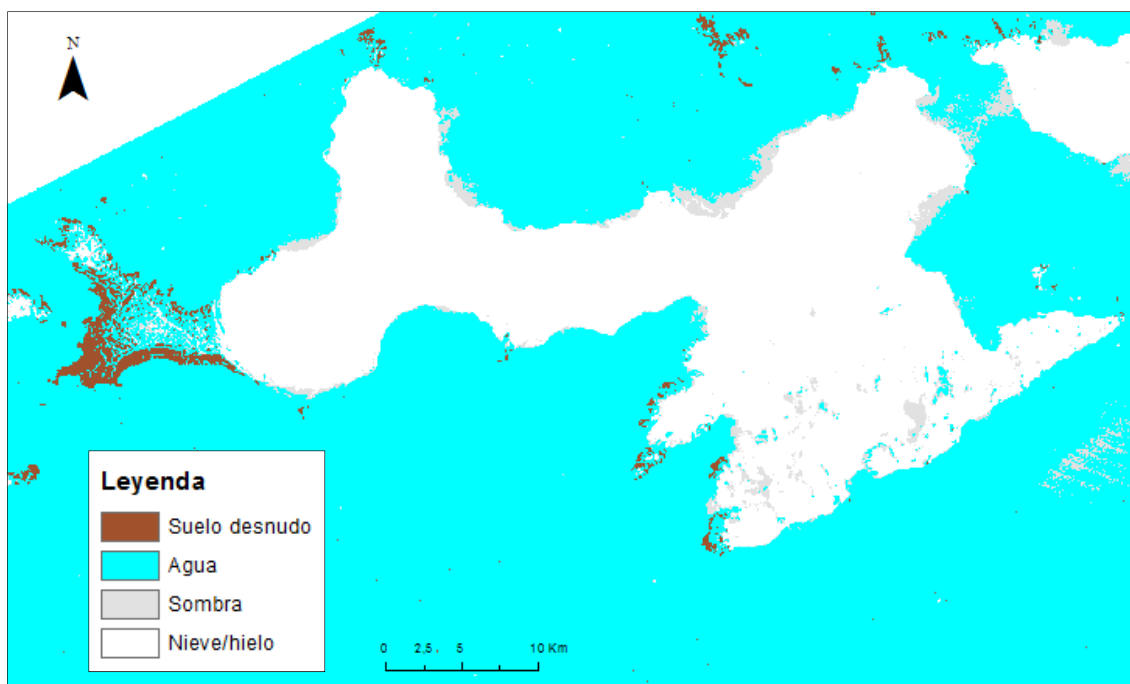


Fig. 48. "Ndsi" Livingston (1988). Fuente: Elaboración propia

Hay que decir que esta clasificación no es buena. Para que se delimite más o menos correctamente la línea de costa en la zona de la Península de Byers se ha tenido que llegar a una solución de compromiso con ciertos píxeles que dentro de la zona terrestre al sur de la isla han sido clasificados como agua.

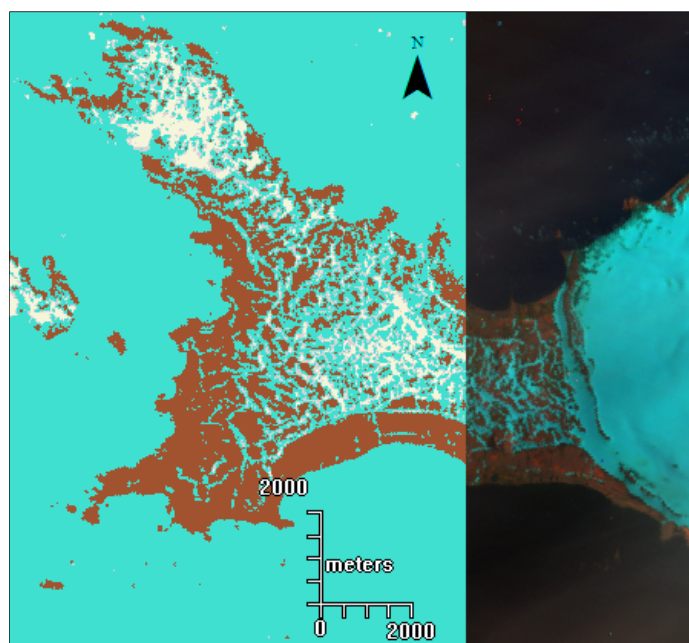


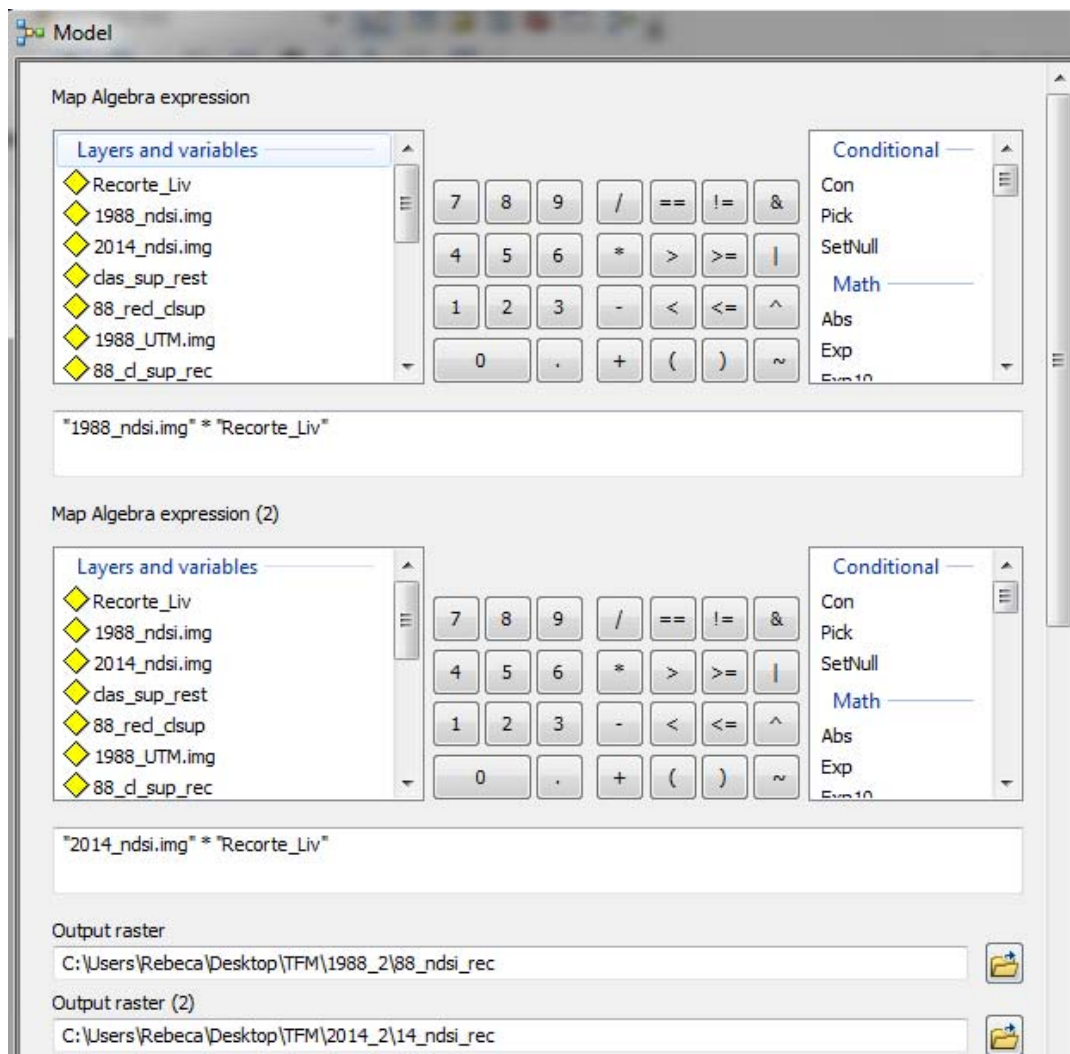
Fig. 49. "Ndsi" Península de Byers (1988). Fuente: Elaboración propia

Y en la zona norte de la isla aparecen zonas fuera del límite de la línea de costa digitalizada que son clasificadas como sombra, y que visualmente aparentan hielo mezclado con mar (Fig. 50), que darán como resultado mayor retroceso.



Fig. 50. "Ndsi" en bahía Vasilev (1988). Fuente: Elaboración propia

Una vez reclasificados los píxeles se aplica el modelo realizado con el "Model Builder".



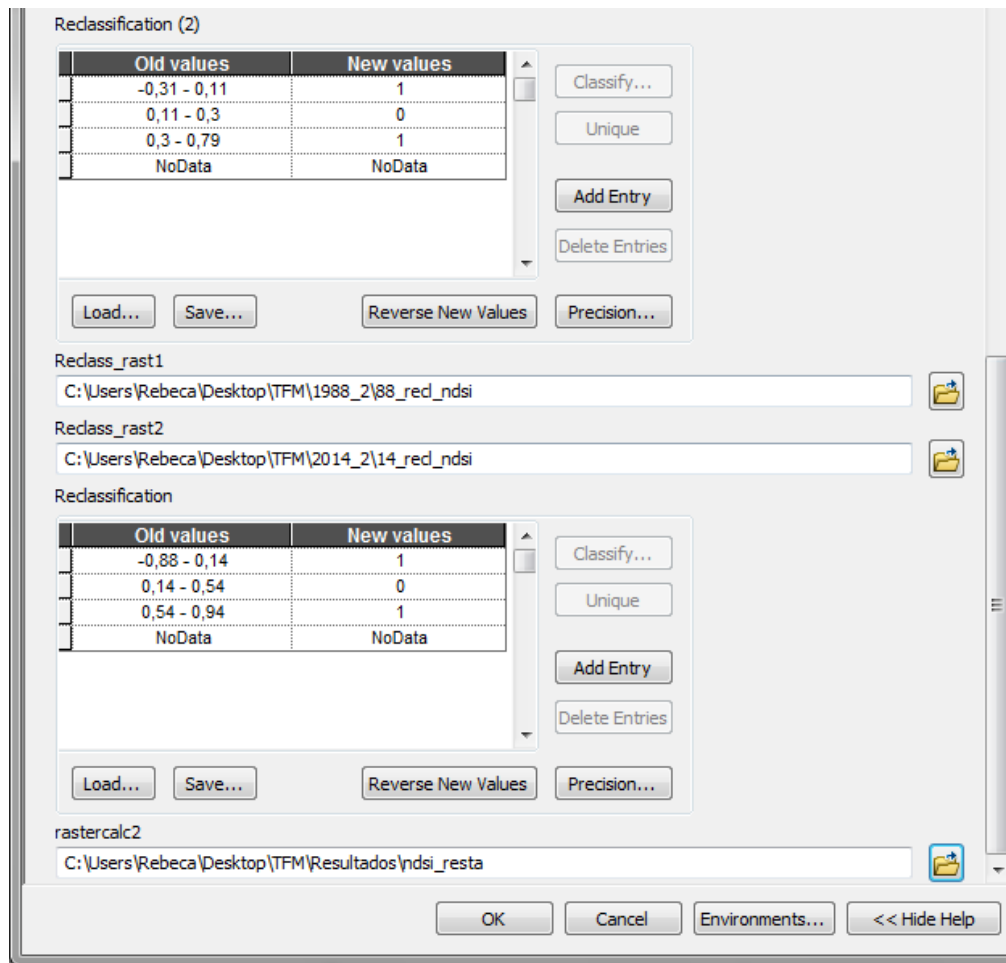


Fig. 51. Modelo realizado con "Model Builder"

El resultado obtenido se aprecia en la siguiente imagen:

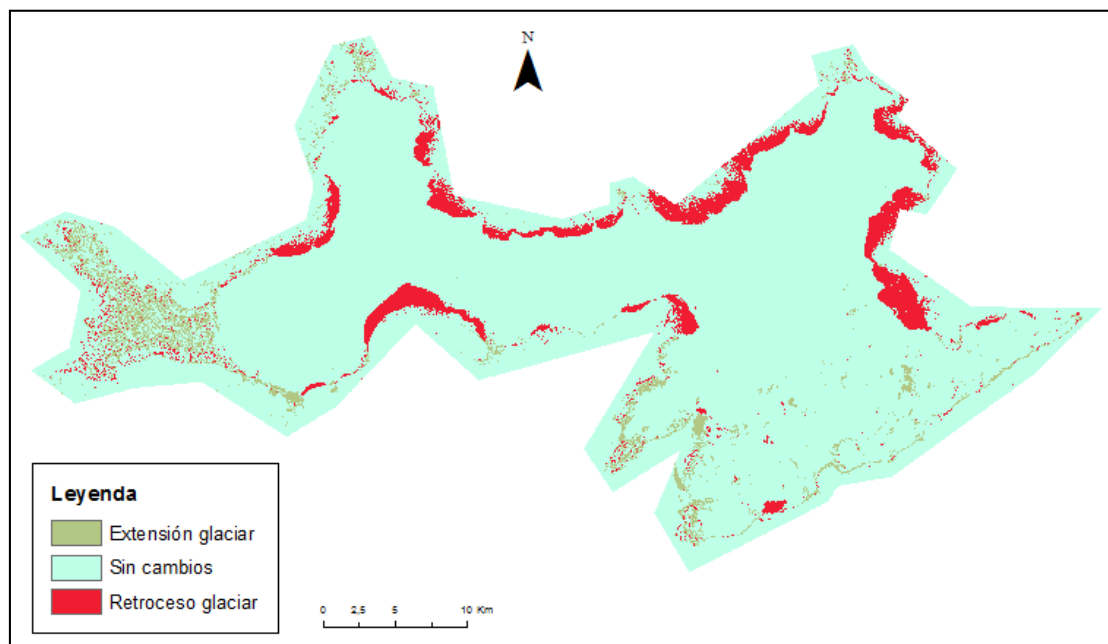


Fig. 52. Retroceso glaciar mediante "ndsi". Fuente: Elaboración propia

Por este método el retroceso calculado es de **86 Km²**, una cantidad bastante más elevada a la clasificación supervisada.

7.4. Ratio 3/5.

El tercer método es el propuesto por Rott, en el que se aplica el cociente entre la banda 3 y la banda 5 del sensor TM. Para aplicar este método se recurre al “*Model Maker*” de ERDAS®, donde se le introduce la siguiente función:

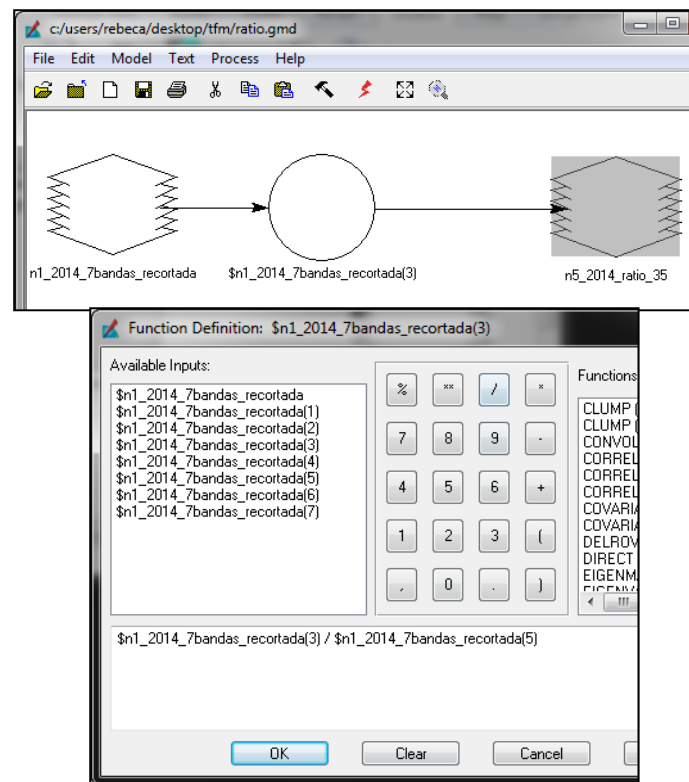


Fig. 53. Modelo elaborado con “Model Maker” de ERDAS para cálculo del ratio 3/5

En esta ocasión se toma como referencia entre hielo y nieve la visualización del hielo en la banda 342 y como valor de hielo/nieve a partir de 1,3.

Se determinan los siguientes intervalos de los valores del píxel que se corresponden con los tipos de superficie según la siguiente tabla:

Valor	Superficie
0 – 1,10	Suelo desnudo
1,10 – 1,4	Agua
1,4 – 2	Agua/Hielo
2 – 9	Nieve/Hielo espeso

Tabla 6. Valores “Ratio 3/5” 2014

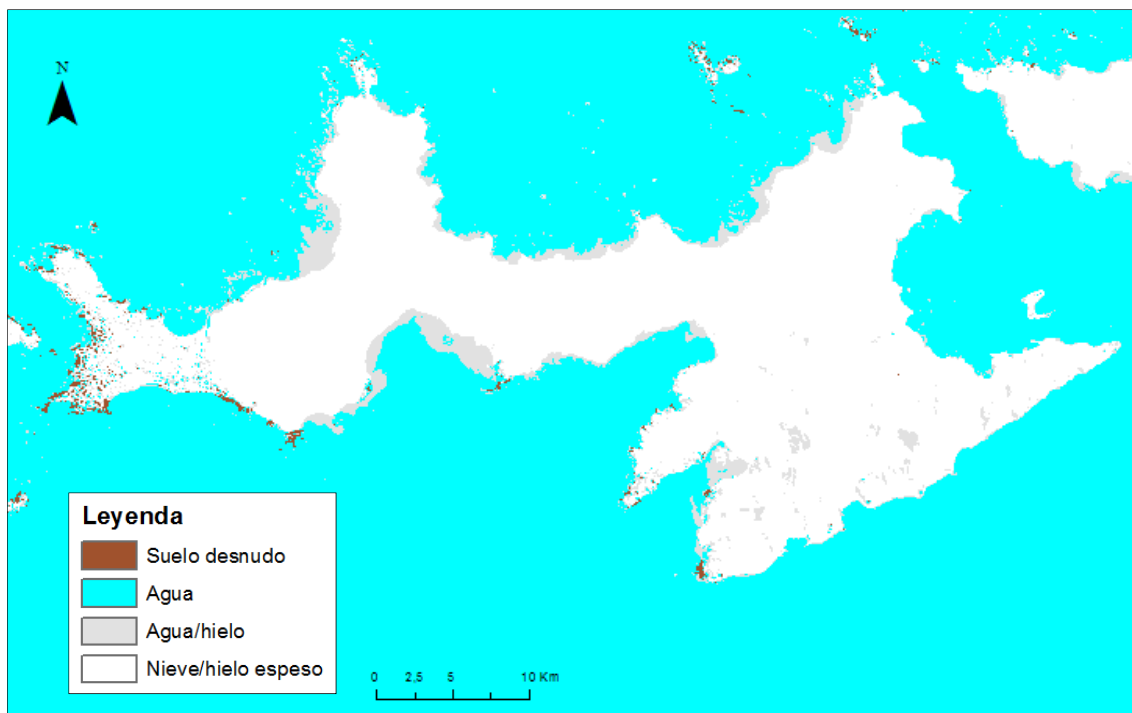


Fig. 54. Ratio imagen 3/5 Livingston (2014). Fuente: Elaboración propia

En la zona claramente clasificada como “*brass*” el valor mínimo de los píxeles es de 2, que correspondería a hielo (Fig 55). Los valores comprendidos entre 1,4 y 2 parecen corresponder mayoritariamente a zonas pegadas a la costa, pudiéndose interpretar que estos píxeles corresponden a zonas donde el agua y el hielo se mezclan. Además, visualmente se aprecian en estas zonas una variación en el tono del agua en la combinación 342 (Fig. 56).

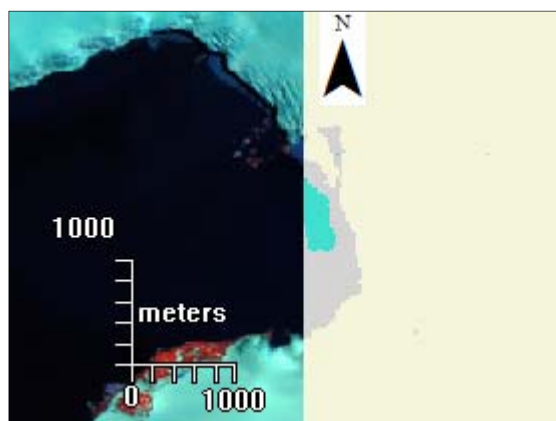


Fig. 55. Ratio 3/5 en Bahía Sur (2014)
Fuente: Elaboración propia

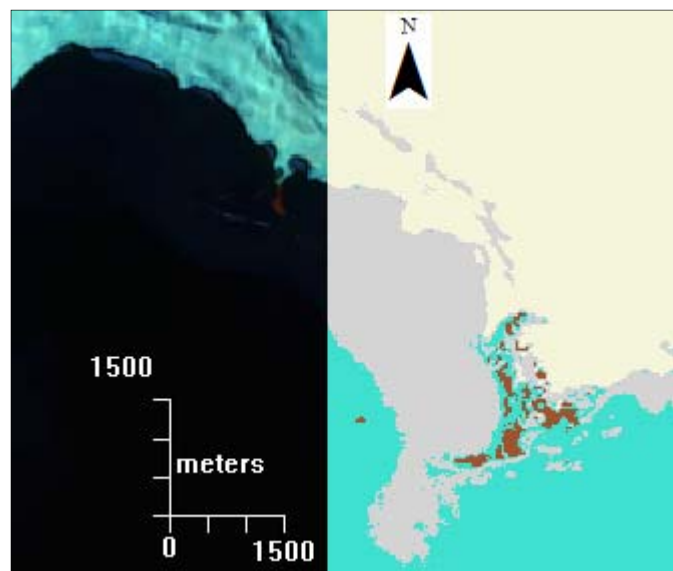


Fig. 56. Ratio 3/5 en Bahía Walker (2014)
Fuente: Elaboración propia

Se observa también que las zonas de sombra de las zonas montañosas no tienen apenas distinción de la clasificación nieve y hielo. Tal como se comentó

anteriormente, este método es mejor para zonas donde existen sombras. Si se observa la isla completa, se puede determinar que en este caso además de la zona determinada como agua, hay que reclasificar como cero la zona clasificada como mezcla agua/hielo en color gris, puesto que esta zona es mayor fuera de la línea costera que dentro en la zona montañosa.

Se hace lo mismo con la imagen de 1988. Y el resultado es parecido al anterior. Se distingue también la zona de agua/hielo limitando con la costa y alguna zona de esta clasificación en la zona de montañas, pero continúa el predominio en la zona marina.

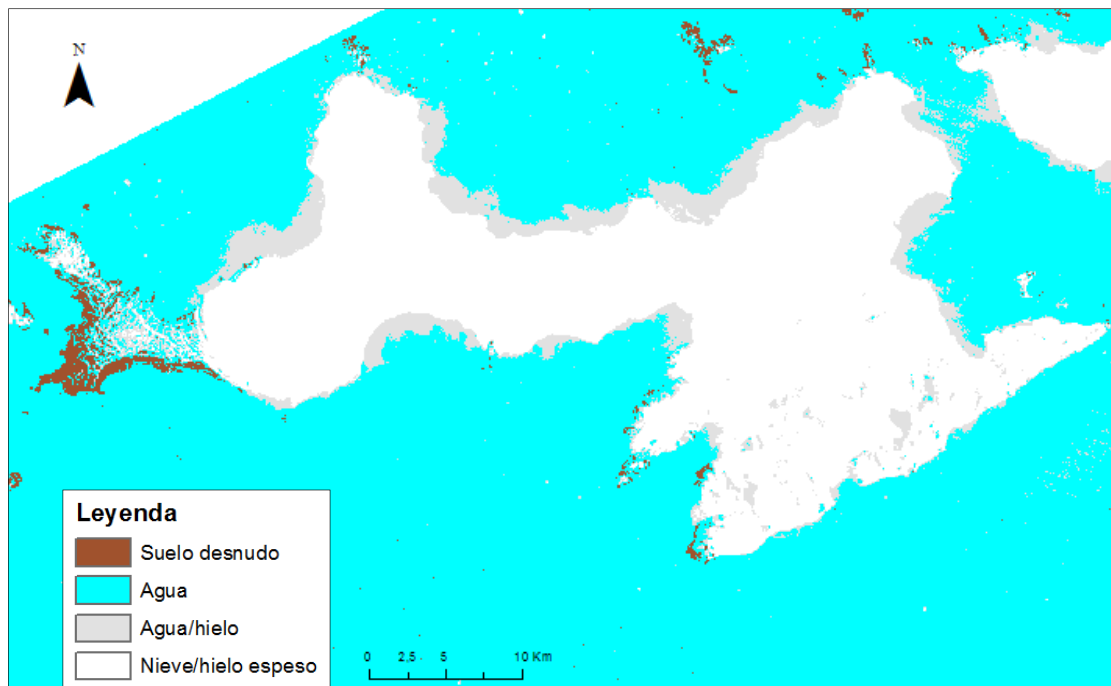


Fig. 57. Ratio imagen 3/5 Livingston (1988). Fuente: Elaboración propia

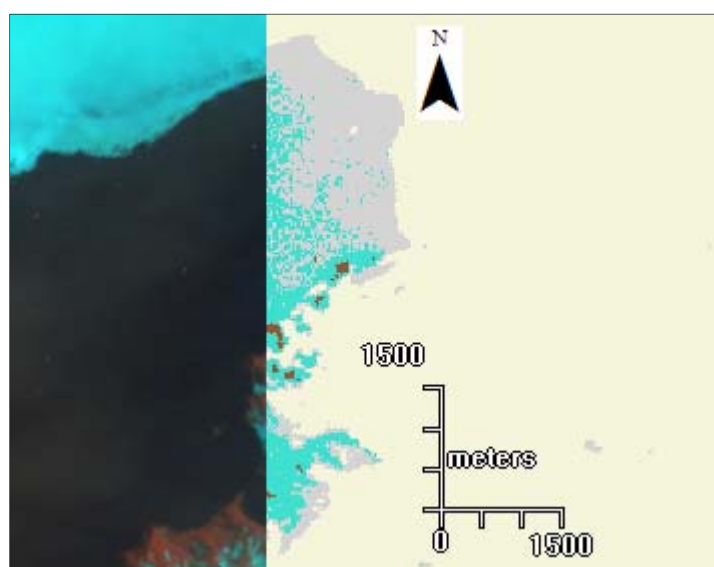


Fig. 58. Ratio imagen 3/5 en Bahía Sur (1988). Fuente: Elaboración propia

Y lo mismo que ocurría en el “*ndsI*”, en la Península de Byers se mezclan zonas de agua con zona de tierra y nieve/hielo (Fig. 59).

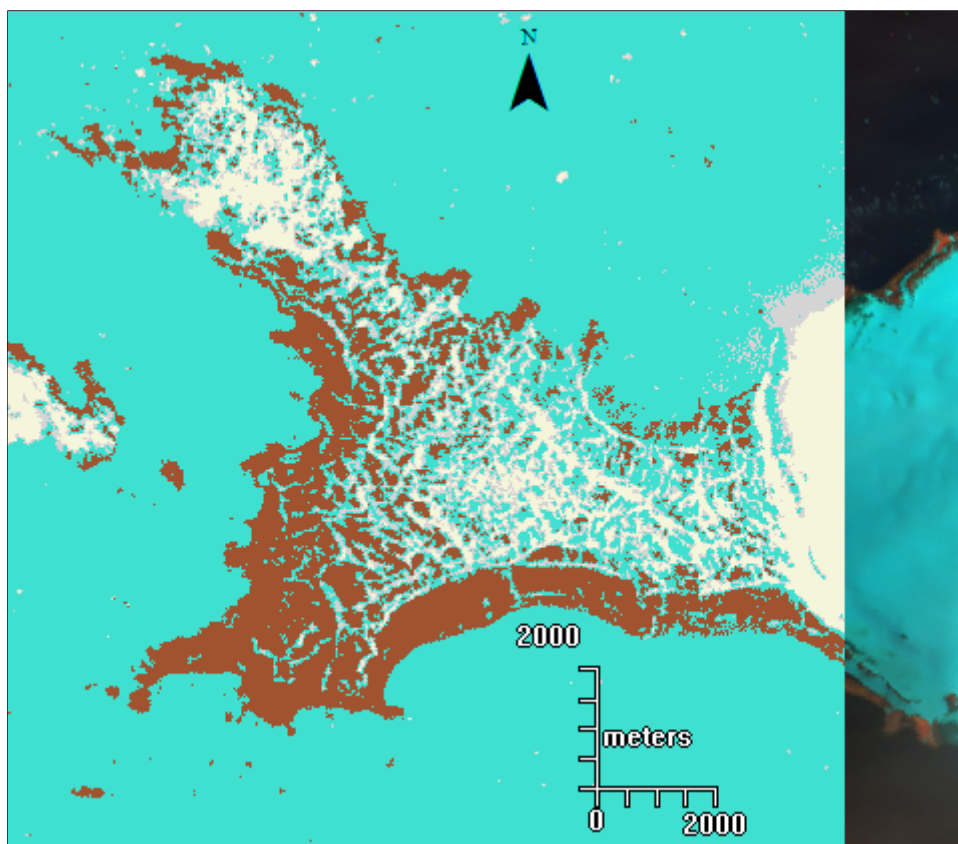


Fig. 59. Ratio imagen 3/5 en la Península de Byers (1988). Fuente: Elaboración propia

En este caso los valores de los píxeles han variado:

Valor	Superficie
0 – 1,3	Suelo desnudo
1,3 – 2,55	Agua
2,55 – 4,2	Agua/Hielo
4,2 – 34	Nieve/Hielo espeso

Tabla 7. Valores “Ratio 3/5” 1988

Se aplica nuevamente el modelo realizado con ArcGis® sobre estas dos nuevas capas con los intervalos determinados y el retroceso glaciar queda representado en la fig. 60.

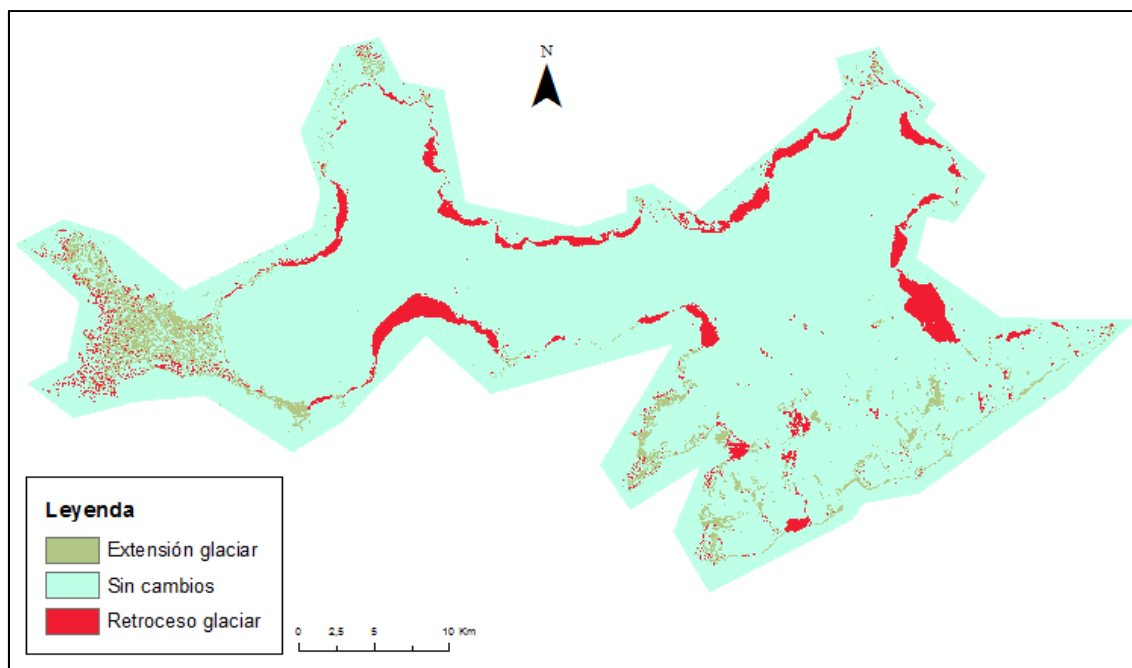


Fig. 60. Retroceso glaciar mediante "Ratio imagen 3/5". Fuente: Elaboración propia

La superficie representada por el retroceso ocupa un total de **67 Km²**.

7.5. Ratio 4/5

El cuarto método consiste en calcular el ratio entre las bandas 4 y 5 del LANDSAT TM, para lo que se aplica nuevamente el "Model Maker" de ERDAS® y se sustituye la banda 3 por la banda 4.

Este método clasifica como nieve/hielo aquellos valores mayores que 1, así que si se toma este valor como referencia inicial, se encuentran la siguiente clasificación de píxeles:

Valor	Superficie
0 – 0,97	Suelo desnudo
0,97 – 1,21	Agua
1,21 – 1,93	Agua/Hielo
1,93 – 7,5	Nieve/Hielo espeso

Tabla 8. Valores "Ratio 4/5" 2014

El resultado de esta operación se visualiza en la fig. 61:

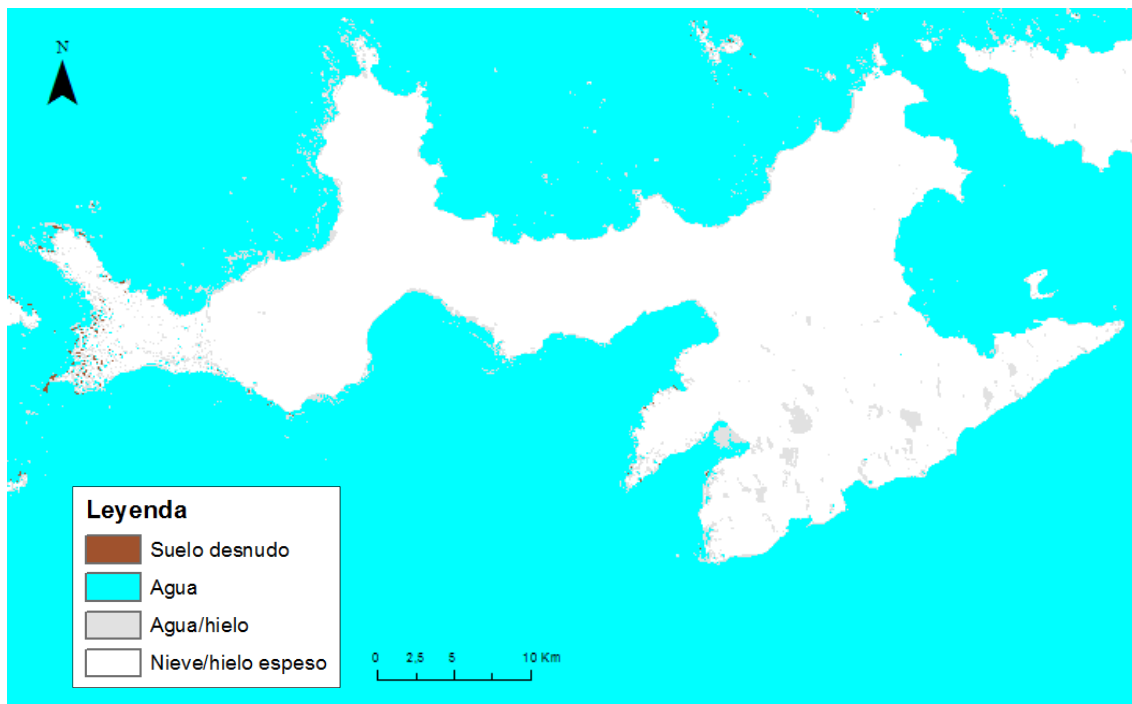


Fig. 61. Ratio imagen 4/5 Livingston (2014). Fuente: Elaboración propia

En esta ocasión se vuelve a comprobar que las zonas donde existe hielo/agua dan reflectividades parecidas a zonas donde hay sombra y cubiertas de nieve/hielo. En este caso los píxeles donde existen sombras son mayores en los que existe mezcla agua/hielo, por lo tanto, éstos se sumarán a los píxeles que forman la superficie terrestre.

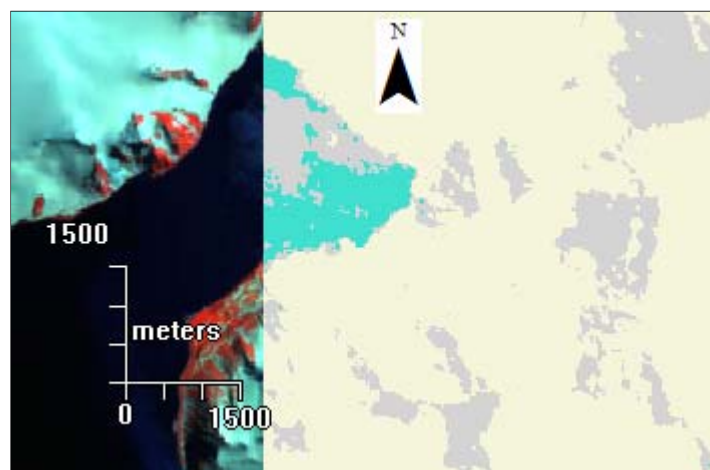


Fig. 62. Ratio imagen 4/5 en la Bahía Falsa (2014). Fuente: Elaboración propia

Se aplica el modelo de ERDAS® del ratio 4/5 sobre la imagen del año 1988, y después de analizar la imagen y asignarle colores a los píxeles según los siguientes intervalos, se obtiene que se distinguen zonas donde el agua se mezcla con el hielo, y coinciden con los píxeles en zonas de sombra.

Valor	Superficie
0 – 0,91	Suelo desnudo
0,91 – 2	Agua
2 – 2,7	Agua/Hielo
2,7 – 26,5	Nieve/Hielo espeso

Tabla 9. Valores "Ratio 4/5" 1988

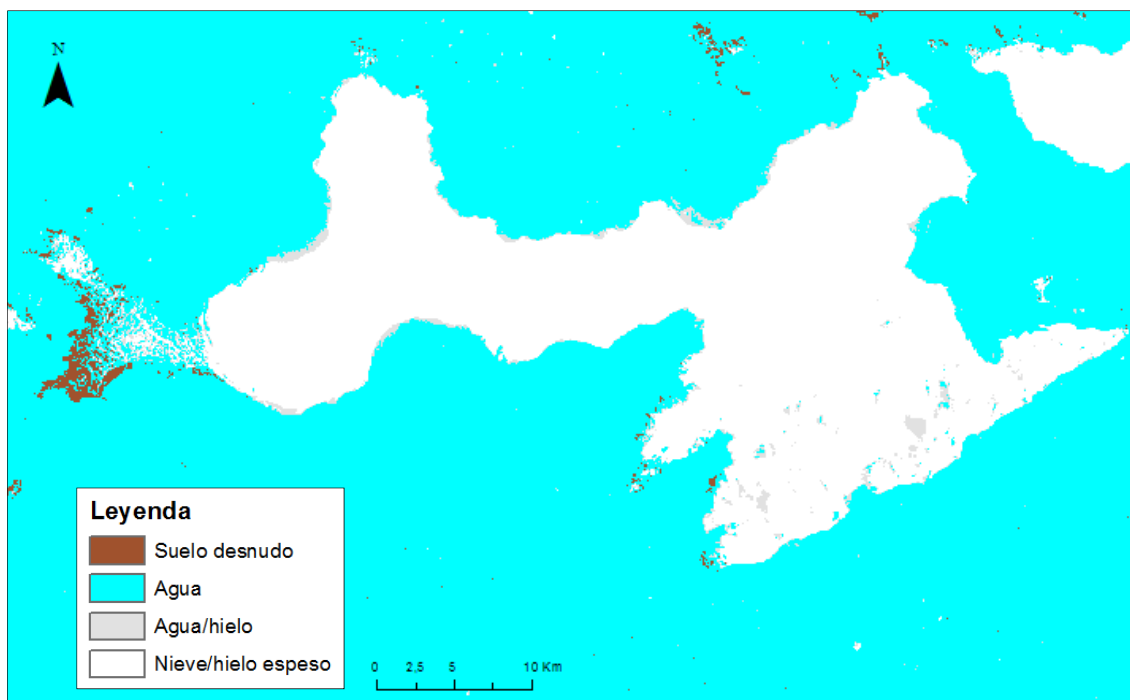


Fig. 63. Ratio imagen 4/5 Livingston (1988). Fuente: Elaboración propia

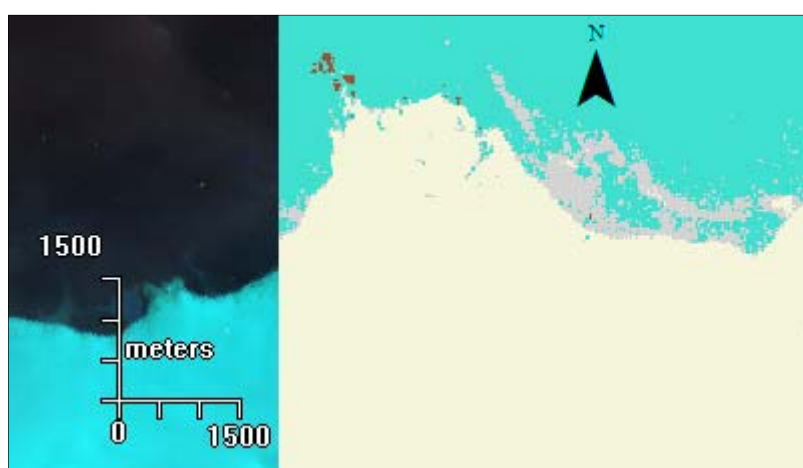


Fig. 64. Ratio imagen 4/5 en Bahía Vasilev. Fuente: Elaboración propia

En la zona de punta Hannah se aprecia que ésta prácticamente ni aparece, aparece píxeles de agua en vez de tierra, probablemente debido a las condiciones atmosféricas de la imagen por la presencia de nubes (Fig. 65).



Fig. 65. Ratio imagen 4/5 en Punta Hannah. Fuente: Elaboración propia

Se aplica una vez más el modelo de ArcGIS®, y el retroceso glaciar en este caso es el siguiente:

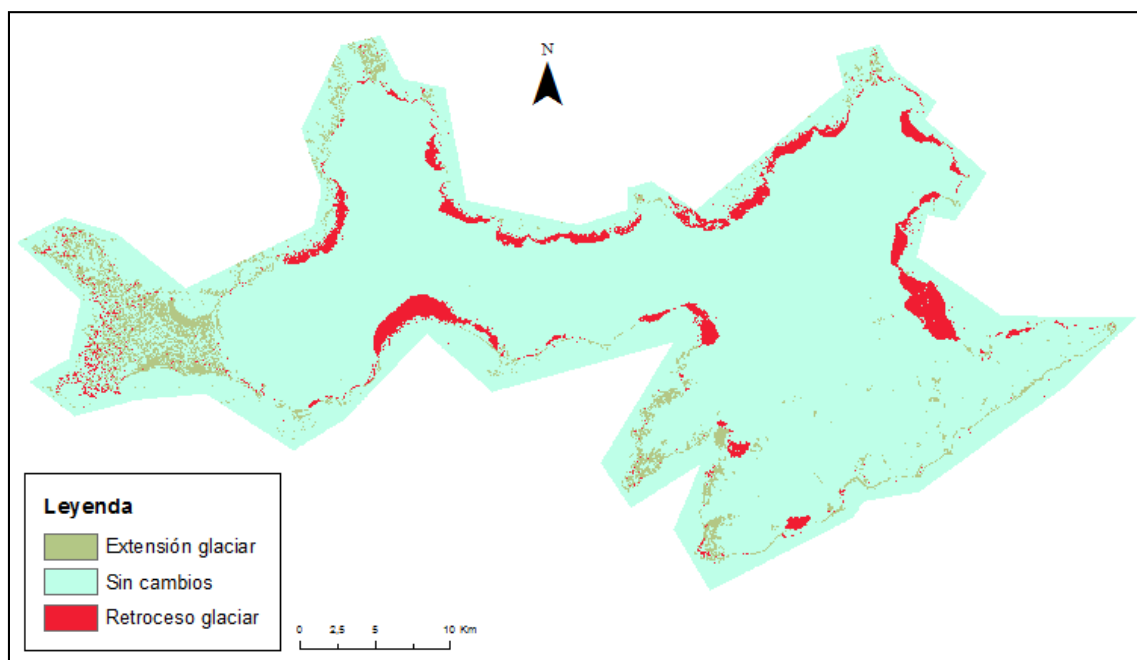


Fig. 66. Retroceso glaciar mediante "Ratio imagen 4/5". Fuente: Elaboración propia

La diferencia entre ambos años en este caso es de **59 Km²**.

7.6. Digitalización manual.

El último método consiste en comparar las dos líneas de costa digitalizadas. Primeramente, la línea de costa digitalizada anteriormente se va a comparar con la cartografía existente del IHM como comprobación de la digitalización y de la calidad de la cartografía de la época. El archivo digital de la carta 004 ANT (proporcionado por el IHM en formato “.dgn” de Microstation) se va a superponer a la imagen del año 1988.

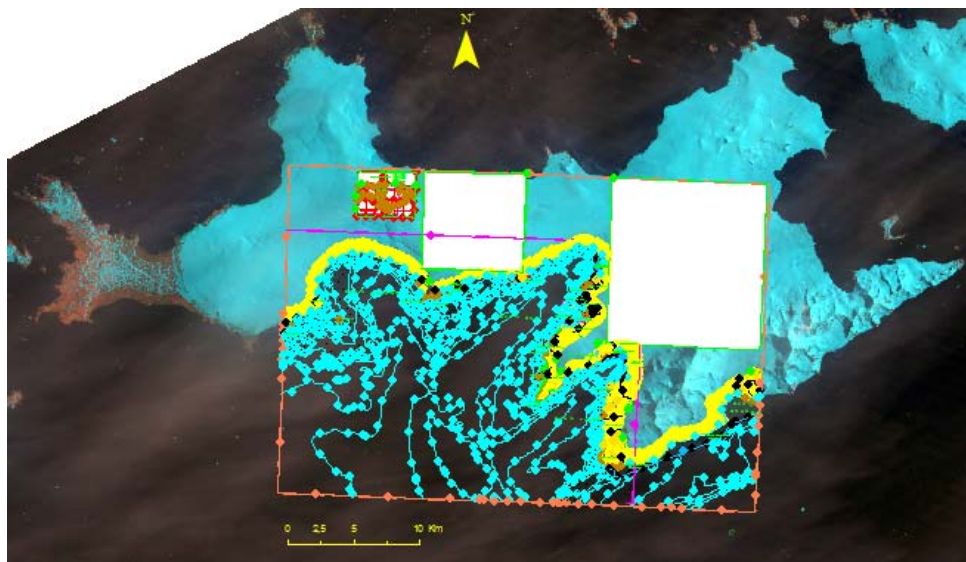


Fig. 67. Imagen del año 1.988 superpuesta a la carta 004. Fuente: Elaboración propia e IHM

Si se centra la imagen en la zona donde se encuentra la Base Juan Carlos I se observa que la línea de costa obtenida desde el satélite (en verde) prácticamente coincide con la línea de costa de la carta náutica del año 1988.

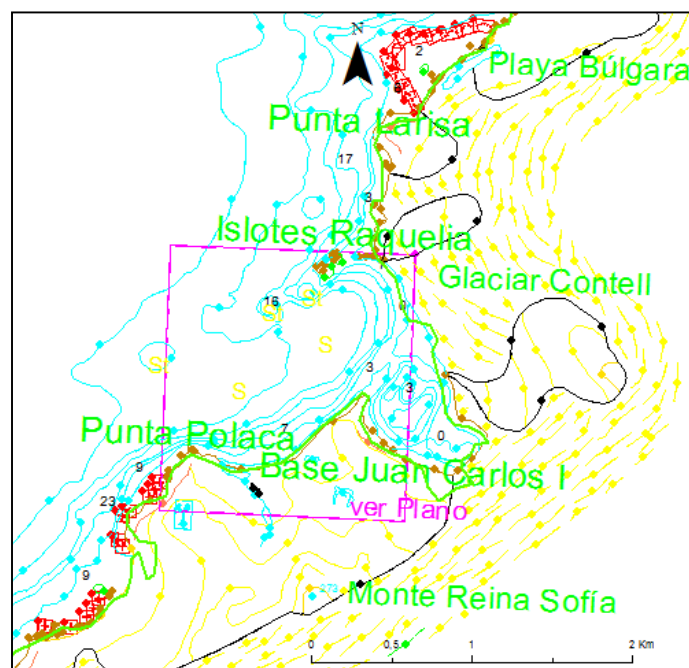


Fig. 68. Comparación línea de costa 1988 con carta 004. Fuente: IHM

Según se señaló anteriormente la zona de glaciares de las cartas náuticas se obtuvo de fotogrametrías del año 1956, lo que implica que debido al retroceso glaciar desde ese año hasta el 88, los límites de éstos tampoco coinciden plenamente. Y se vuelve a poner de manifiesto la necesidad de actualización de la cartografía en la zona glaciar (Fig. 69).

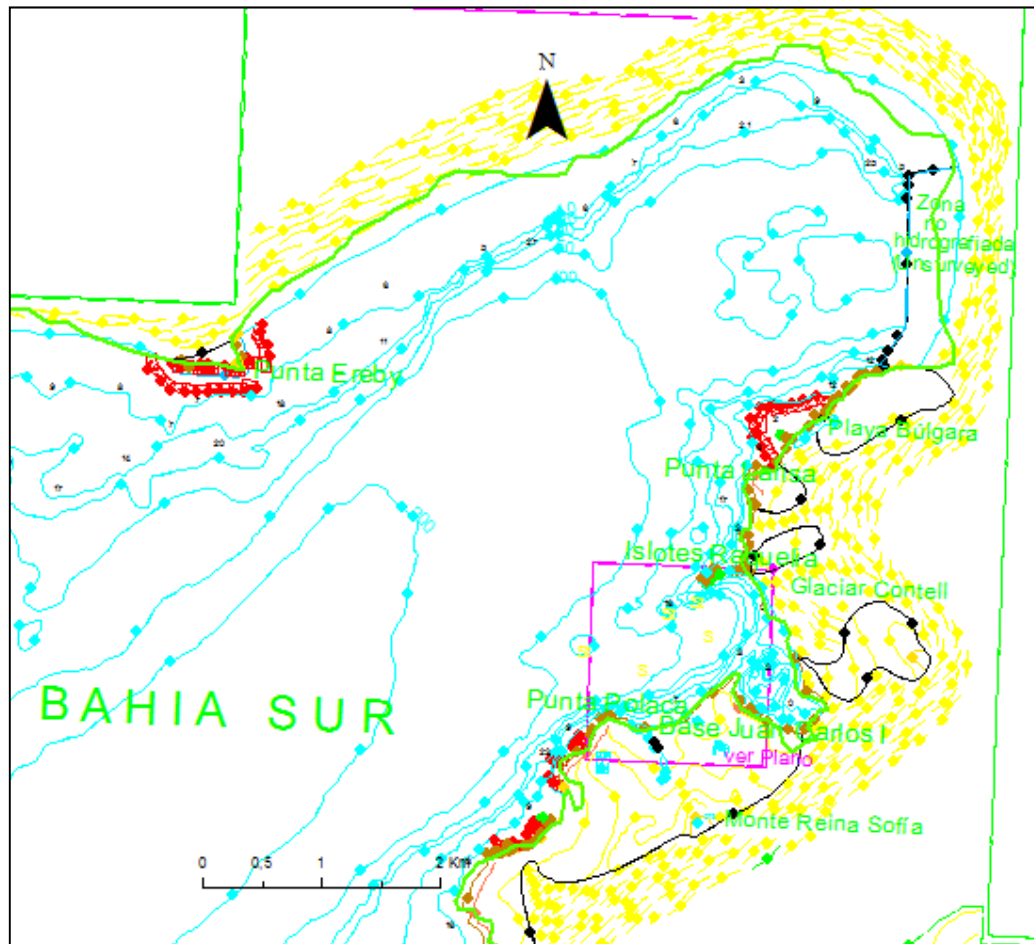


Fig. 69. Bahía Sur en la carta 004. Fuente: IHM

Para el cálculo del retroceso en esta ocasión se van a comparar las superficies ocupadas por la línea de costa del año 1988 y la del año 2014. La diferencia entre ambas será el retroceso producido por los glaciares en Livingston.

Para ello las capas de línea de costa se convertirán primeramente a capa de polígonos mediante las herramientas de ArcGIS® y se realizará un “erase” sobre la capa del polígono de 1988 con la capa de polígono de 2014. El resultado que se obtiene es el siguiente:

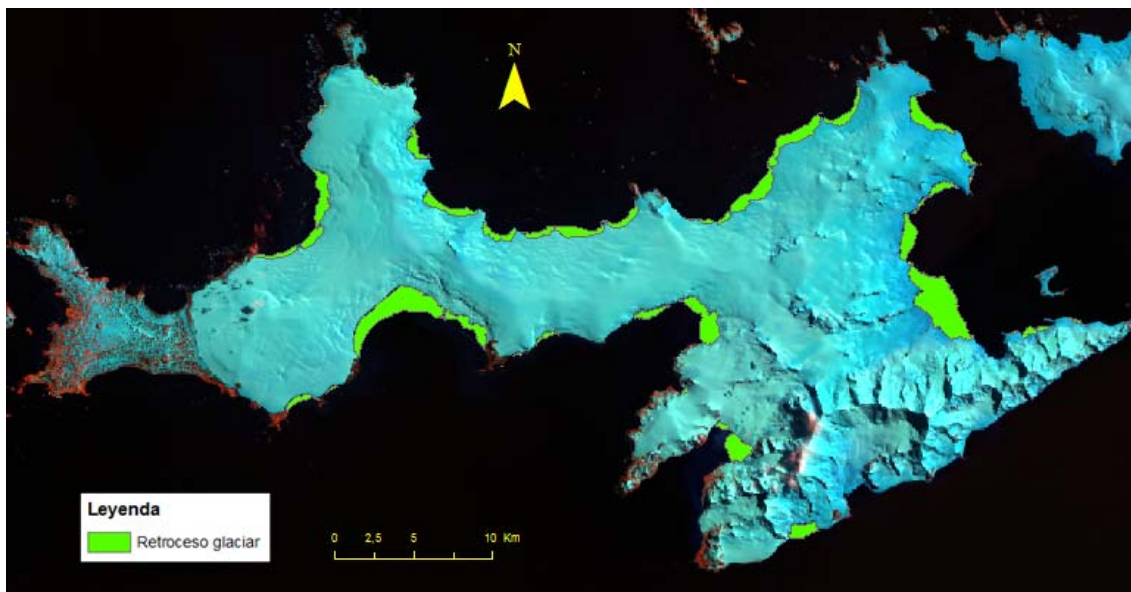


Fig. 70. Retroceso glaciar mediante digitalización manual superpuesta con imagen de Livingston del año 2014.
Fuente: Elaboración propia

Empleando nuevamente las herramientas de ArcGIS®, se obtiene que esta superficie ocupa un total de **49 Km²**.

Esta metodología podría ser la más precisa para el cálculo del retroceso glaciar en este tipo de superficie, donde lo que hay que delimitar es la línea de costa en los distintos años, y dependería principalmente de la calidad de la imagen, puesto que con imágenes de media resolución como es el caso del LANDSAT, la digitalización no es muy precisa, aunque de la forma en que se ha realizado, modificando únicamente las zonas donde ha habido variaciones, los errores se minimizan. Otro aspecto a tener en cuenta en este método es la habilidad de la persona que realiza la digitalización, puesto que los resultados podrían variar si la realizasen diferentes operadores.

7.7. Resultados.

Haciendo una comparación de los resultados de los distintos métodos:

Método	Retroceso
Clasificación supervisada	52 Km ²
Ndsi	86 Km ²
Ratio 3/5	67 Km ²
Ratio 4/5	59 Km ²
Digitalización	49 Km ²

Tabla 10. Retroceso obtenido según los distintos métodos

Se comprueba que los resultados más parecidos con la digitación manual son los obtenidos con la clasificación supervisada, y dentro de las metodologías empleadas para el cálculo de superficies de glaciares, el *ratio imagen 4/5* es el que más se aproxima. Tal como se dijo antes, teóricamente, este es el mejor método para la eliminación de las variaciones de las sombras.

La digitalización podría producir mejores resultados si el satélite fuese de alta resolución como los descritos en los apartados anteriores, y así podría servir para la actualización de cartografía.

En cartografía, la resolución requerida según la escala viene determinada por el “*graficismo*”, considerado como aquella cantidad, que a la escala de la carta, corresponde la mínima distancia apreciable por el ojo humano. Se asume como la distancia que a la escala de la carta corresponde a 0,2 mm. Luego, para una resolución de 30 metros que tiene el LANDSAT, la cartografía que representaría los detalles según el “*graficismo*” sería aquella donde la escala fuese de 1:150.000 ($30/0,0002$). Si se utilizase la escala pancromática, como se ha usado en la digitalización, la máxima escala de representación sería 1:75.000.

Aún así, siendo de media resolución, se podrían utilizar las imágenes satélite únicamente como actualización de la zona glaciar. En la siguiente imagen de la zona de la Base Juan Carlos I, a una escala de 1:15.000 se aprecian los errores cometidos en la digitalización de la costa del año 2014, pero en zonas como la señalada donde el retroceso glaciar es evidente, se podría actualizar la cartografía según las imágenes obtenidas en caso de no existir la posibilidad de realizar taquimetrías por las zonas del glaciar por la peligrosidad que implica realizar un caminamiento, teniendo en cuenta que los cambios son significativos.

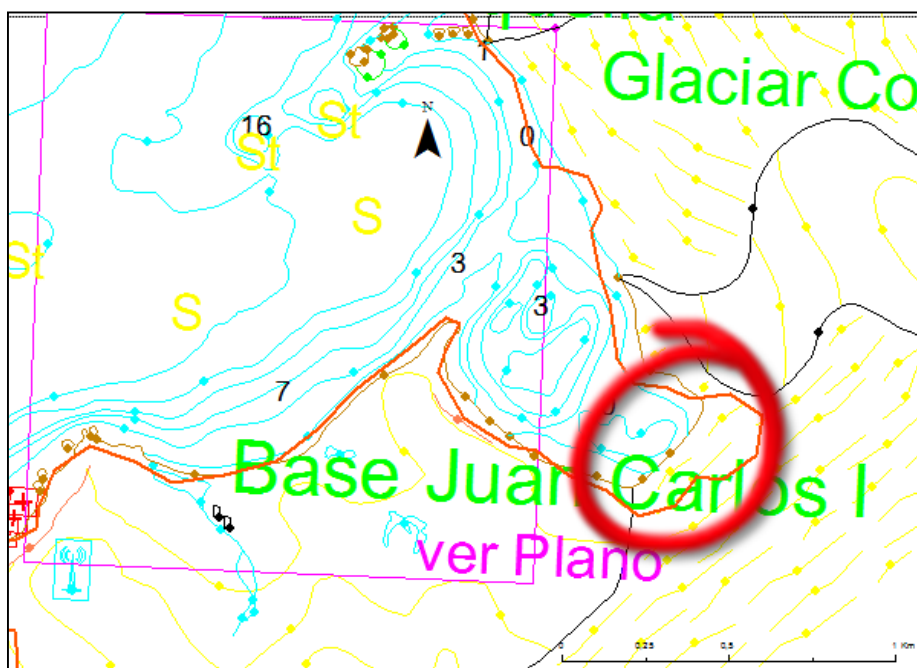


Fig. 71. Línea de costa de 2014 a escala 1:15.000. Fuente: Elaboración propia e IHM

8. CONCLUSIONES.

Para la producción de cartografía náutica es importante determinar el límite entre la costa y el mar, así como mantener una actualización del mismo en casos donde éste haya variado, bien por la acción del hombre, como por ejemplo en la construcción de puertos, o bien, por causas naturales, como puede ser el caso de estudio.

Ante la imposibilidad de realizar trabajos de campo en la zona de estudio, se ha realizado una estimación remota de los cambios en la línea de costa de Isla Livingston mediante la utilización de diversos métodos, y como una primera aproximación, se ha demostrado mediante la interpretación y análisis de las imágenes satélite, que al menos esta zona al norte de la Península Antártica en áreas donde existen glaciares, éstos han sufrido un marcado retroceso, que repercute en variaciones notables de la línea de costa.

Los glaciares están influenciados por las temperaturas y las precipitaciones, y una vez analizadas ambas durante los años de estudio, se ha comprobado que éstas no han variado significativamente.

Entre los métodos empleados para el cálculo del retroceso, el método más fiable, a pesar de depender del pulso y la observación del operador, y de la calidad de las imágenes, parece ser la digitalización manual, puesto que delimita la línea de costa y puede calcular con la diferencia entre superficies el retroceso producido.

El resto de los métodos en otras latitudes parecen más apropiados para calcular superficies de glaciares en montañas, donde la superficie nival tiene una clara diferenciación con el suelo desnudo y permite diferenciarla también de zonas cubiertas por nubes. Los resultados que más se aproximan a los cálculos de la digitalización manual son los obtenidos mediante la aplicación del método "*ratio 4/5*".

El mayor problema encontrado en la determinación de la cubierta hielo/nieve ha sido encontrar la separación entre el hielo y las superficies de sombra en algunas imágenes o entre el hielo y el agua cuando éstos parecen mezclarse en el océano. Se ha tenido que llegar a un equilibrio entre las clasificaciones.

Todos resultados se han visto influenciados por la mala calidad de la imagen del año 1988, que aparece cubierta por nubes, que aunque de poco espesor, alteran la reflectividad de las distintas superficies.

La superficie retrocedida según las diferentes metodologías se encuentra entre 49 y 86 Km². Estos resultados podrían haber sido más precisos y con menores errores si se hubiesen empleado imágenes satélite de mayor resolución. Es importante destacar que existen sensores de satélites que proporcionan hasta 30 cm de resolución espacial.

Una vez comprobado el retroceso, se hace evidente la necesidad de actualización de la cartografía antártica cada cierto periodo de tiempo. Para ello, se ha visto que además de taquimetrías realizadas en zona, se pueden utilizar imágenes satélite. Lo ideal son las imágenes de alta resolución, y que compañías como *Google* las proporcionan gratuitamente, pero puede ser que ni estén actualizadas o que no existan de la zona en estudio, lo que habría que recurrir a la compra de las mismas. La actualización de la cartografía litoral debería permitirse poder adquirir imágenes de alta resolución, pues mejoraría mucho la calidad y fiabilidad de la cartografía resultante. Especialmente, en regiones polares tan adversas el uso de diferentes imágenes de satélite se hace imprescindible. Sin embargo, el objetivo y falta de soporte económico de este trabajo no lo ha permitido.

Teniendo en cuenta que la cartografía sólo ha variado en zonas donde existe glaciar, se puede tener en consideración la utilización de imágenes satélite de media resolución, que son gratuitas y aunque tampoco se le aplique la reducción por marea, siempre es más recomendable actualizar la línea de costa que mantener los límites antiguos.

BIBLIOGRAFÍA

Aguilar Anfrons, E. “*Caracterización del patrón térmico diario estival. Sector de Johnson’s dock. Isla Livingston. Shetland del Sur (Antártida)*”. Dentro del Vilá Valentí, Joan. El seu mestratge en la Geografia Universitaria. Universidad de Barcelona. Pag. 461-484.

Alonso, C. y Moreno, V. (1969). “*Análisis multitemporal de imágenes LANDSAT TM en la cartografía de las masas de hielo y nieve aplicada a la modelización hidrológica*”. Revista de Teledetección núm 7. Diciembre, 1996.

Bañón García, M. “*El clima en la zona de influencia de la Base Antártica Española Juan Carlos I*”. Papeles de Geografía, núm. 20, pág. 27 - 47.

Bustamante, J., R. Díaz-Delgado, et al. (2005). “*Determinación de las características de masas de aguas someras en las marismas de Doñana mediante teledetección*.” Revista de Teledetección núm. 24, pág. 107 - 111.

Cea López, C, Cristóbal Roselló, J. , Pons Fernández, X. “*Determinación de la superficie nival del Pirineo Catalán mediante imágenes LANDSAT y MODIS*”.

Corberá, J., Calver, J., Palá, V. (1996) “*Estudio por teledetección de la dinámica del glaciar de Bahía Falsa Isla Livingston (Antártida)*”. Revista de Teledetección núm 6, Junio.

Chuvieco, E. y Hantson S. Plan Nacional de Teledetección de Media Resolución. Procesamiento Estándar de imágenes Landsat. Documento técnico de algoritmos a aplicar. Febrero 2010.

Dozier, J. (1989) “*Spectral signature of alpine snow cover from the Landsat Thematic Mapper*”. Remote sensing of environment núm. 28, pág 9 - 22.

Fuentes J., Guillermo S. “*Principales aplicaciones de los sensores Thematic Mapper(TM) y Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) de LandSat para el estudio de glaciares*”.

Gaoa, J. and Liub, Y. “*Applications of remote sensing, GIS and GPS in glaciology: a review*”. Progress in Physical Geography” núm. 25, pág. 520 - 540.

Jacobs, J. D., Simms, E. L. y Simms, A. “*Recession of the southern part of Barnes Ice Cap, Baffin Island, Canada, between 1961 y 1993, determined from digital mapping of Landsat TM*”. Journal of Glaciology núm. 43, pág. 98 - 102.

Hall, D.K., Ormsby, J.P., Bindshadler, H. y Siddalingaiah, H. “*Characterization of snow and ice reflectance zones on glaciers using Landsat TM data*”. Annals of Glaciology núm. 9, pág. 104-108.

Hanstson, S., Chuvieco, E., Pons, X., Domingo, C., Cea, C., Moré, G., Cristóbal, J., Peces, J.J., y Tejeiro, J.A. (2011). “*Cadena de pre-procesamiento estándar para las imágenes Landsat del Plan Nacional de Detección*”. Asociación española de teledetección. Revista de Teledetección núm. 36.

Maestro Cano, I., Recio Recio, J. (2004). “*Análisis comparativo de distintos métodos de estimación de la superficie glaciar en el Pirineo axial aragonés a partir de imágenes Landsat*”, GeoFocus núm. 4, pág. 79 - 92.

Martínez Vega, J. y Martín Isabel, M.P. Guía didáctica de teledetección y medioambiente. Red nacional de Teledetección ambiental.

Medina Díaz, G., Dr. Mejía Marcacuzco, A. “*Análisis Multifractal de la deglaciación de los nevados Huandoy y Pastoruri en los Andes de Perú*”.

Ministerio de Defensa. Expedición Antártica española durante el verano austral 1989/1990.

Moreu Munáiz, E., Fernández Riestra, F.A., Noguerol Fernández, J.M. España en la Antártida, La Primera expedición del B/O Las Palmas.

Raup, B., Kääb, A., Kargel, J.S., Bishop, M.P., Hamilton, G., Lee, E., Paul, F., Rau, F., Soltesz, D., Singh Khalsa, S.J., Beedle, M. and Helm, C. (2007) “*Remote sensing and GIS technology in the Global Land Ice Measurements from Space (GLIMS) Project*”. Computers & Geosciences núm. 33. Pág. 104-125.

Rebollo, L. (2010). Geología Física. Las formas del relieve: modelado glaciar y periglaciar.

Rott, H. (1994). “*Thematic studies in alpine areas by means of polarimetric SAR and optical imagery*”. Advances in Space Research núm. 14, pág. 217 - 226.

Strahler, A.N. y Strahler, A.H (1989). Geografía física. Barcelona, Omega.

Pérez González, M.E. y García Rodríguez, M.P. (2014). “*Evolution in sea ice from 1978 to 2012*”. Environmental Earth Sciences.

Vargas Gonzáles, C., Villón Reinoso, C., Pasapera Gonzáles, J. (2009). “*Comparación de técnicas para el mapeo de cobertura glaciar con imágenes LANDSAT y ASTER en la Cordillera Blanca, Ancash, Perú*”. Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal, Brasil, 25-30 abril, Pág. 6911-6917.

